

不同条件下生态缓冲带对氟化物面源污染的阻控效果

徐颖, 谭婷, 任劲松, 李玉, 向彪, 朱永乐, 汤家喜

(辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 生态缓冲带可有效截留阻控非点源污染物向水体中迁移。选取紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)、高羊茅(*Festuca elata* Keng ex E. Alexeev)、草木樨(*Melilotus officinalis* (Linn.))、早熟禾(*Poa annua* L.)和黑麦草(*Lolium perenne* L.) 5 种草本植物构建模拟生态缓冲带, 通过人工模拟径流试验, 探讨不同植被类型、污染物入流浓度、生态缓冲带坡度以及施加生物炭种类条件下, 生态缓冲带对径流中氟离子阻控效果的影响。结果表明: 早熟禾生态缓冲带对径流中氟化物的阻控效果最好, 当流量为 0.5 L/min, 入流浓度为 4 mg/L, 坡度为 5°时, 其对氟化物浓度的阻控效率为 13.1%, 质量阻控效率为 92.6%; 当流量为 0.5 L/min, 入流浓度为 8 mg/L, 坡度为 5°时, 其浓度阻控效率为 20.6%, 质量阻控效率为 96.4%; 坡度越小, 生态缓冲带对氟化物阻控效果越好; 当流量为 0.5 L/min, 入流浓度为 4 mg/L, 坡度为 5°时, 添加玉米秸秆生物炭后的生态缓冲带径流阻控效率均有提高, 其中草木樨缓冲带最为明显, 其地表径流的阻控效率提高 23.8%。

关键词: 生态缓冲带; 生物炭; 氟化物; 径流; 阻控

中图分类号: X173

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)02-0361-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2022.02.046

Interception and Control Effects of Ecological Buffer Zone on Fluoride Non-point Source Pollution Under Different Conditions

XU Ying, TAN Ting, REN Jingsong, LI Yu, XIANG Biao, ZHU Yongle, TANG Jiayi

(School of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000)

Abstract: The ecological buffer zone can effectively intercept and control the migration of non-point source pollutants into the water body. Alfalfa, tall fescue, sweet clover, Kentucky bluegrass and ryegrass were selected to construct a simulated ecological buffer zone. Through an artificial runoff simulation experiment, the effects of ecological buffer zone on the inhibition and control effect of fluoride ion in runoff under the different conditions, including different vegetation types, pollutant inflow concentrations, ecological buffer zone slopes and biochar types were discussed. The results showed that the ecological buffer zone of Kentucky bluegrass had the best effect on the inhibition and control of fluoride in runoff. When the flow was 0.5 L/min, the inflow concentration was 4 mg/L and the slope was 5°, the inhibition and control efficiency of fluoride concentration was 13.1% and the quality inhibition and control efficiency was 92.6%. When the flow rate was 0.5 L/min, the inflow concentration was 8 mg/L and the slope was 5°, the concentration resistance control efficiency was 20.6% and the mass resistance control efficiency was 96.4%. This means the smaller the slope, the better effect of ecological buffer zone on fluoride inhibition and control. When the flow was 0.5 L/min, the inflow concentration was 4 mg/L and the slope was 5°, the runoff inhibition and control efficiency of the ecological buffer zone was improved by adding corn straw biochar, especially the sweet clover buffer zone, whose surface runoff inhibition and control efficiency was increased by 23.8%.

Keywords: vegetation filter strips; biochar; fluoride; runoff; interception

近年来, 农业及城市面源污染对水环境的影响问题日益突出^[1]。面源污染物可通过地表径流或地下

渗流等方式进入接纳水体中, 引起水环境质量持续恶化^[2]。生态缓冲带又称河岸植被缓冲带或湖滨缓冲

收稿日期: 2021-08-29

资助项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41501548)

第一作者: 徐颖(1969—), 女, 副教授, 主要从事水环境污染治理研究。E-mail: zb0595@163.com

通信作者: 汤家喜(1986—), 男, 副教授, 主要从事面源污染防治研究。E-mail: tangjiayi@lntu.edu.cn

带,是山水林田湖草综合治理的重要举措,是控制非点源污染的最有效措施之一^[3-5],目前已得到国内外学者的普遍认可。已有研究^[6-8]表明,生态缓冲带可以通过物理、化学、生物等途径使径流中的泥沙、氮、磷、农药等污染物质减少,很大程度上可降低面源污染带来的危害。生态缓冲带对面源污染物阻控作用受多种因素的影响,主要包括缓冲带坡度、宽度、植被类型、径流流量、污染物浓度以及水文地质条件等^[9]。6 m 宽的生态缓冲带对地表径流中总氮的阻控效率可达 42.9%^[10]。魏忠平等^[9]研究发现,宽度为 1.2 m、坡度为 5% 的黑麦草生态缓冲带对地表径流和渗流中氮氮的阻控效率均高于 25%,对径流中总磷的阻控效率可达 12.4%;而付婧等^[5]研究发现,当径流入流流量增高为 0.24 L/s 时,草本缓冲带对总氮及阻控效率仅为 9%。

现阶段,国内外学者对生态缓冲带阻控面源污染的研究主要集中于对悬浮物、氮磷及农药等常规污染物,而对氟化物面源污染的阻控作用鲜见报道。辽宁省阜新地区富含氟元素的萤石矿物资源丰富,东北最大的氟化工产业基地即坐落于此。氟的高背景值以及当地的工农业活动,通过降水、径流及入渗等过程,使得该地区水体氟化物含量升高,部分地区地下水氟浓度高达 9.6 mg/L^[11]。因此,高氟地区氟化物面源污染的防控显得尤为必要。

一般情况下,现有生态缓冲带技术阻控农业面源污染物具有较好效果,但遇到径流量及污染负荷过大等特殊情况时,常规生态缓冲带作用受到限制。对此,本研究将生物炭材料应用在生态缓冲带体系中。生物炭具有良好的孔隙结构、较大的比表面积及丰富的表面官能团,能够较好地吸附、阻滞水土中的污染物^[12]。利用生物炭材料强化生态缓冲带阻控氟化物面源的能力,可降低极端情况下生态缓冲带净化面源污染物能力不足的风险。因此,本研究选取 5 种草本植物(紫花苜蓿、高羊茅、草木樨、早熟禾、黑麦草)模拟生态缓冲带,并在土壤中添加一定比例的玉米秸秆和水稻稻壳生物炭,探究不同植被类型、径流入流浓度、坡度以及生态缓冲带与生物炭耦合作用等条件下生态缓冲带对氟化物的阻控效果,以期高氟地区氟化物面源污染的防控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 模拟生态缓冲带土壤 供试土壤于 2021 年 3 月采自阜新市细河生态缓冲带内,采样深度 0—20 cm,土样经自然风干、用孔径 2 mm 的尼龙滤网筛除

其中的石子、植物残体等杂物后,备用。对模拟生态缓冲带的基本理化性质进行测定,土壤类型为砂壤土,土壤容重 1.4 g/cm³,含水率 12.4%,pH 7.6,有机质含量 6.2 g/kg,速效磷含量 29.7 mg/kg,速效钾含量 296.3 mg/kg,碱解氮含量 68.3 mg/kg,全氮含量 0.4 g/kg,全磷含量 13.7 g/kg,全钾含量 44.5 g/kg,土壤中原有的水溶性氟化物浓度为 5.8 mg/kg。

1.1.2 生物炭 试验选用 2 种生物炭,均购置于河南省郑州立泽环保科技有限公司。制备方式为以水稻稻壳和玉米秸秆为原料,采用外加热式生物质连续热解炭化技术,于管式中在升温速率 20 ℃/min,炭化终温 450 ℃ 的条件下炭化,制备过程充氮气以绝氧。2 种生物炭基本指标参数为:玉米秸秆生物炭,粒径范围为 1.7~29.9 μm,pH 7.9,BET 表面积为 10.1 m²/g,总孔体积为 0.6 cm³/g;水稻稻壳生物炭,粒径范围为 1.3~34.3 μm,pH 7.6,BET 表面积为 28.3 m²/g,总孔体积为 0.5 cm³/g。

1.2 试验设计

采用自制试验装置(图 1),长 70 cm,宽 20 cm,深 15 cm,箱体可进行 0~30° 的坡度调节。箱体底部均匀布设透水孔,以模拟自然条件下土壤底层入渗排水情况。装置通过调节阀门控制水泵抽水流量,连接流量计,水流通过供水管进入径流扩散板后流入箱体,保证径流均匀稳定的进入生态缓冲带。箱体末端设有出水口,用于收集径流出水。将供试土壤以 5 cm 厚度分层填入箱体中,每层土壤用木棒压实,保证层间良好结合。其中部分处理土壤需混合不同生物炭,将购置的生物炭用研钵研磨,过 100 目筛后,通过手动混合将过筛后的生物炭按 0.02:1 的比例与土壤混合均匀后,按上述方法将混合土壤填入箱体内。

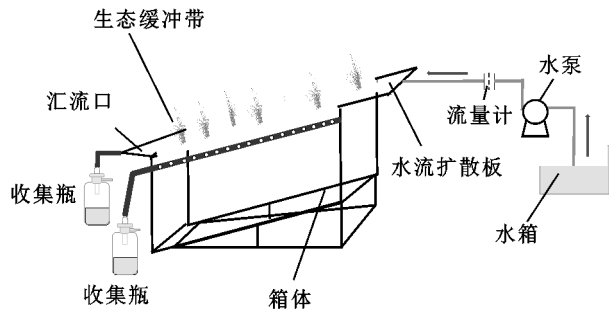


图 1 试验装置示意

选取黑麦草、草木樨、早熟禾、高羊茅以及紫花苜蓿 5 种草本植物,于 2021 年 5 月 1 日进行种植,5 种草本植物种植密度分别为黑麦草、紫花苜蓿、草木樨为 100 kg/hm²,早熟禾为 150 kg/hm²,高羊茅为 100 kg/hm²^[9,13-15],均采用条播,间距为 10~15 cm,待出苗后,置于室外培养。试验共分为 4 组,每组设置 3

个平行试验。试验周期为 3 个月,待植物生长 1 个月(苗期)及 2 个月(后期)进行人工模拟径流试验。向水箱中加入含氟化物的污水,以模拟地表径流,流速为 0.5 L/min,每次径流历时 10 min,水池内设置搅拌器保证径流中氟离子浓度均匀,用水泵将配好的含氟溶液泵入储水箱中。设计氟离子入流浓度分别为 4、8 mg/L,生态缓冲带坡度分别为 5°和 10°,土壤中分别施加水稻稻壳(RH)和玉米秸秆(CS)2 种生物炭材料,并设未施加生物炭的对照(CK)。试验测定不同植被类型(R_1)、径流入流浓度(R_1 、 R_2)、坡度(R_1 、 R_3)及生物炭与缓冲带耦合作用(R_1 、 R_4 、 R_5)等情况下生态缓冲带对径流中氟离子的阻控效果,试验设计见表 1。

表 1 试验设计				
设计	浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	坡度/ ($^{\circ}$)	流量/ ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	生物炭 种类
R_1	4	5	0.5	CK
R_2	8	5	0.5	CK
R_3	4	10	0.5	CK
R_4	4	5	0.5	RH
R_5	4	5	0.5	CS

1.3 分析方法与数据处理

1.3.1 氟离子含量的测定 水样及土壤中氟离子含量的测定均采用氟离子选择电极法。水样中测定方法根据国家环境保护标准 GB 7484—87 测定;土壤中氟离子含量测定方法依据国家环境保护标准 HJ 873—2017 测定。

表 2 生态缓冲带在不同生长阶段地表径流的阻控效率						单位: %
阻控效率	空白	早熟禾	黑麦草	紫花苜蓿	高羊茅	草木樨
苗期地表径流	43.2	91.5	72.5	86.5	64.3	61.7
后期地表径流	39.0	95.7	77.0	58.8	68.9	93.7

从图 2 可以看出,生态缓冲带同空白处理对比对氟离子浓度的阻控效率和质量阻控效率都有明显提升。苗期早熟禾缓冲带对氟离子的质量阻控效率达到 92.6%。其次效果好的是紫花苜蓿,其质量阻控效率和浓度阻控效率分别达到 89.6%和 23.0%,黑麦草、高羊茅和草木樨缓冲带对氟离子浓度的阻控效率和质量的阻控效率并无显著性差异。后期试验中,早熟禾缓冲带对氟离子的质量阻控效率依然很高,达 96.4%,浓度阻控效率达 15.9%,草木樨缓冲带对氟离子的质量阻控效率有明显的提高,达 95.0%,与苗期相比,其质量阻控效率提升 26.3%。而在苗期对氟离子阻控效果较好的紫花苜蓿缓冲带在后期对氟离子的质量阻控效率和浓度阻控效率急剧下降分别只有 62.9%和 9.9%。黑麦草和高羊茅缓冲带在苗期和

1.3.2 数据处理 地表径流的阻控效率 R_{water} (%)的计算公式为:

$$R_{\text{water}}=(1-\frac{V_i}{V_0})\times 100\% \tag{1}$$

氟离子浓度的阻控效率 R_1 (%)的计算公式为:

$$R_1=(1-\frac{C_i}{C_0})\times 100\% \tag{2}$$

氟离子质量的阻控效率 R_2 (%)的计算公式为:

$$R_2=(1-\frac{C_i V_i}{C_0 V_0})\times 100\% \tag{3}$$

式中: V_0 和 V_i 分别为径流入流量和出流量(L); C_i 和 C_0 分别为径流入流和出流处的氟离子浓度(mg/L)。采用 SPSS 19.0 软件对试验数据进行分析,并用 Origin 2021 软件进行制图。

2 结果与分析

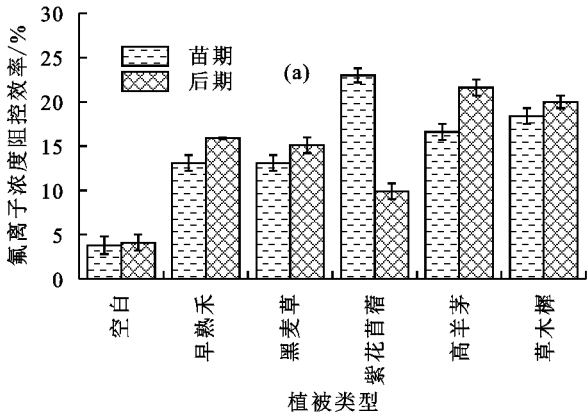
2.1 不同植被类型生态缓冲带对氟化物的阻控效果

从表 2 可以看出,相比于空白对照,有生态缓冲带存在的坡面能更有效地拦截径流。在苗期及后期试验中早熟禾缓冲带对地表径流的阻控效果均较好,效率分别达到 91.5%和 95.7%,草木樨缓冲带苗期对地表径流的阻控效率仅为 61.7%,但到后期则达到 93.7%。草木樨和高羊茅缓冲带在后期对地表径流的阻控效率较苗期也有明显提升,而紫花苜蓿则相反。生态缓冲带的存在降低径流流速,改变缓冲带内土壤孔隙状况以及增加入渗率,从而实现提高生态缓冲带对地表径流阻控效率的效果。

后期对氟离子的阻控效率差别不大。

5 种类型生态缓冲带对径流中氟离子的阻控效果苗期表现为早熟禾>紫花苜蓿>高羊茅>黑麦草>草木樨>空白;后期表现为早熟禾>草木樨>高羊茅>黑麦草>紫花苜蓿>空白。分析发现,主要是因为:(1)地表形态在缓冲带对径流量的阻控能力上有较大影响,早熟禾、紫花苜蓿都属于贴地生长的植物,高羊茅和黑麦草的地表覆盖率较高,增大地表的粗糙度,对地表径流产生良好的阻滞作用,减缓径流流速,增大径流入渗时间。(2)有研究^[16]表明,植物能显著改善土壤结构,并通过植物根系的穿插作用增加土壤渗透能力,从而使地表径流及可溶性污染物更多地随水入渗。不同根系结构特征使得表层土壤结构存在差异,而土壤结构与径流下渗能力密切相

关。王敏等^[17]也表示,植被种植可以改善土壤的渗透性,增加径流的入渗。本试验中所用的 5 种缓冲带植被均为草本植物,根系较浅,表层土壤下渗效果较好。早熟禾根系发达,土壤孔隙度增大,提高入渗效果。(3)从苗期到后期缓冲带对氟离子的阻控效率普遍提高,其中草木樨的效果最为明显,因为根系不断发育,根系形态不断发展变化,其中也包括根系的物理作用。根系分泌物、根系穿插作用、根系对蚂蚁、蚯蚓等动物的影响等因素都可能导致土壤孔隙结构改善和入渗能力增加。



植被类型通过生物量及根系作用影响污染物去除效率。生物量越大,曼宁系数越大,则流速越小,根系作用越强,下渗量越大,越有利于污染物的去除^[18]。所以植被普遍在后期较苗期时对径流的阻控效果更好。而紫花苜蓿缓冲带对氟离子的阻控效率反而大幅度降低,这是由于后期人工模拟径流试验是在苗期人工模拟径流试验的基础上进行的,后期紫花苜蓿缓冲带的生物量明见减少,反映出紫花苜蓿缓冲带对氟离子的耐受能力较差,氟离子对于紫花苜蓿的生长造成较大影响。

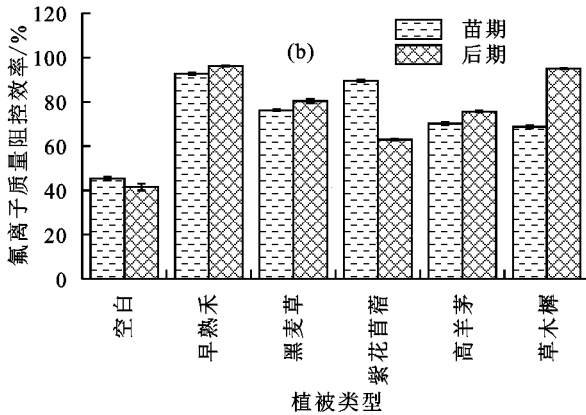


图 2 生态缓冲带对径流中氟离子的阻控效率

2.2 不同入流浓度下生态缓冲带对氟化物阻控效果的影响

入流浓度也是生态缓冲带净化效果的重要影响因素。本试验径流中的氟离子浓度分别为 4, 8 mg/L,其余参数均一致。由图 3 可知,除紫花苜蓿外,其余几种生态缓冲带对地表径流中氟离子质量的阻控效率均在高入流浓度的情况下优于低入流浓度,其中早熟禾缓冲带在高浓度情况下对氟离子的阻控效果

最好,其对氟离子浓度的阻控效率和质量阻控效率分别达到 20.6%和 96.4%。黑麦草、高羊茅及空白对照均在高浓度情况下较低浓度情况下的浓度阻控效率有明显提升,分别达到 21.4%,17.3%和 5.6%,说明入流浓度越大,其沿程浓度降低速率越快,生态缓冲带对径流中氟离子的阻控效果越好。但是草木樨和紫花苜蓿的浓度阻控效率反而随着入流浓度的升高而有所降低,分别只有 14.8%和 17.3%。

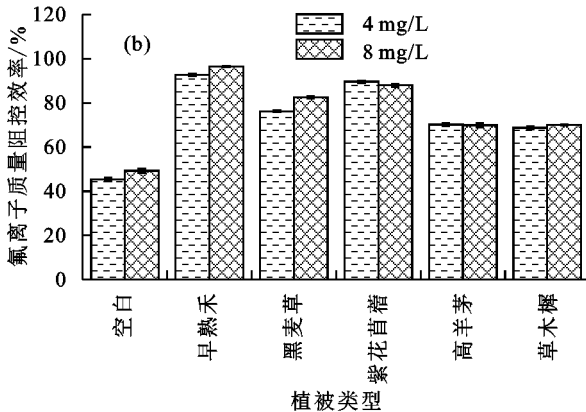
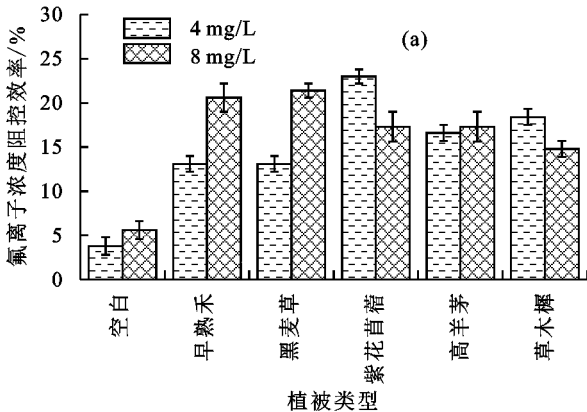


图 3 不同入流浓度下生态缓冲带对氟离子的阻控效率

目前关于生态缓冲带拦截可溶性污染物试验研究^[19]中普遍认为,入流污染物浓度越高,拦截效果越好,而本研究中入流氟化物浓度变化对不同生态缓冲带拦截效率的影响略有差异。径流流过缓冲带时,氟化物大部分被植物截留或吸附在土壤以及植物表

面,小部分吸附在不易被截留的径流中有机质等表面,当不超过生态缓冲带所能承受的污染负荷范围时,缓冲带均能对径流中的污染物起到较好的净化效果^[20]。分析得出,黑麦草、高羊茅等生态缓冲带所能承受径流中污染物的负荷范围较大。在高浓度氟离子条

件下,草木樨和紫花苜蓿生态缓冲带超出其所承受的污染负荷,所以阻控效果变差。考虑到生态缓冲带对一定浓度范围的氟离子具有良好的阻控效果,且植物叶片对氟化物的吸收能力较强,叶绿体是氟化物积累的主要场所,吸收的氟化物对植物产生相当严重的伤害。所以应当对生态缓冲带的植被进行合理定期的刈割。

2.3 不同坡度下生态缓冲带对氟化物阻控效果的影响

坡度变化是重要的地形因素,为探究坡度对生态缓冲带阻控污染物效果的影响,本试验设定 2 种坡度,分别为低坡度(5°)和高坡度(10°)。由图 4 可知,紫花苜蓿、黑麦草、高羊茅和草木樨等生态缓冲带对径流中氟离子浓度的阻控效率受坡度影响较大,其中黑麦草和高羊茅缓冲带在低坡度时径流中氟离子浓

度的阻控效率分别为 13.1%和 16.6%,质量阻控效率分别为 76.2%,70.2%,但是在高坡度中浓度阻控效率只有 3.8%和 6.6%,分别降低 9.3%,10.0%,质量阻控效率只有 69.6%,63.6%,分别各降低 6.6%。随着坡度的增加,各生态缓冲带中的径流产流时间均有一定缩短,坡度为 10°时的空白处理仅用 17 s 开始产流。5 种生态缓冲带随着坡度的增加径流量大幅增加,质量截留效率也普遍降低,这与孙晓涛^[21]的研究结论一致,坡度可影响径流流深和流态,坡度平缓的河岸带地表径流的速度较缓,利用颗粒物沉降,阻控效果较好;相反,陡坡使径流速度加快,并且多按照已形成的沟壑流下,不受植被的影响,大大降低河岸带的作用^[22]。

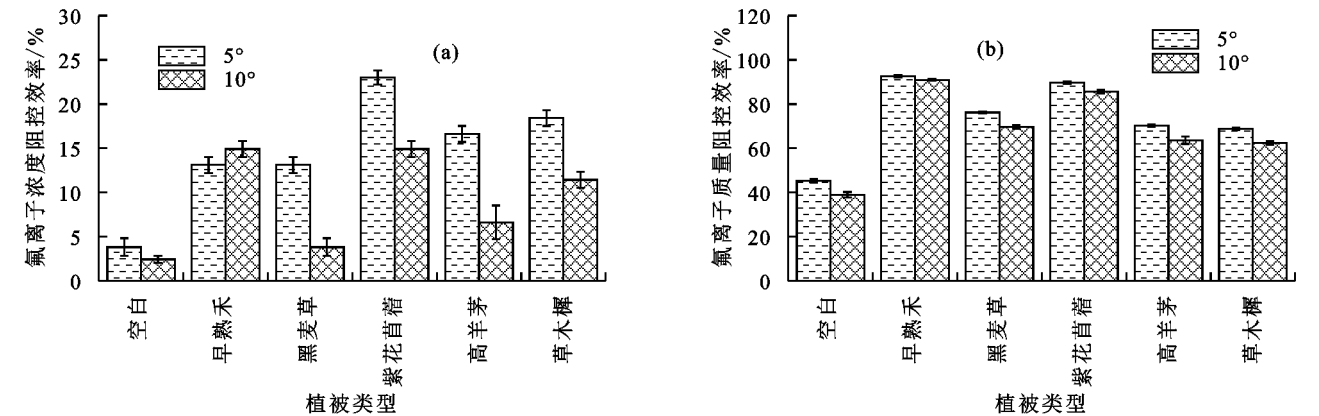


图 4 不同坡度下生态缓冲带对氟离子的阻控效率

有研究^[23]表明,对坡度与植物篱下径流量、水土及养分流失量回归分析发现,坡面的径流量、水、土及养分流失量受到坡度的影响显著。植物篱对径流、泥沙和污染物质的拦截效果随着坡度的增加而减弱。本研究表明,不同坡度下生态缓冲带对污染物阻控效率的影响显著,与 Dorioz 等^[24]的研究结果不同,这主要是由于本研究采用小型模拟植被缓冲带装置,带长仅为 0.7 m,带长越短,生态缓冲带受到坡度的影响越明显。在其他条件相同的情况下,流域的坡度越高,重力作用越强,水沿坡面向下流动的速率越快,即地面对于径流的滞留能力越弱,径流流经植被缓冲带用时变短,径流中污染物不能充分入渗,入渗效果差,径流量增大。在自然条件下情况更为复杂,应选用最为适宜的坡度建造生态缓冲带以达到良好的治理效果。

2.4 生态缓冲带与不同生物炭耦合对氟化物阻控效果的影响

由表 3 可知,除添加水稻稻壳生物炭的黑麦草、紫花苜蓿 2 种生态缓冲带外,其余施加生物炭生态缓冲带对地表径流的阻控效率较未施加生物炭的缓冲带均有一定提升。不同生物炭与生态缓冲带耦合作用对径流中氟化物的阻控效果呈显著差异($P<0.5$),其中施加水

稻稻壳生物炭的早熟禾缓冲带对地表径流的阻控效率最好,高达 96.2%。添加玉米秸秆生物炭后的生态缓冲带径流阻控效率均有提高,其中草木樨缓冲带最为明显,其地表径流的阻控效率提高 23.8%。由图 5 可知,加入水稻稻壳后的早熟禾缓冲带径流浓度阻控效率为 29.8%,是所有处理中浓度阻控效率最高的,其次为施加玉米秸秆后的紫花苜蓿缓冲带,其对径流中氟离子的浓度阻控效率为 24.6%。添加生物炭的生态缓冲带(除添加水稻稻壳的黑麦草、紫花苜蓿缓冲带外)相比于未添加生物炭的生态缓冲带延长产流时间,有效减少径流量,对径流中氟离子质量的阻控效率均有明显提升。其中生物炭对草木樨缓冲带的影响最为显著,未添加生物炭的草木樨缓冲带对径流中氟离子质量的阻控效率为 68.7%;添加玉米秸秆后的草木樨缓冲带对氟离子质量的阻控效率为 87.0%,提高 18.3%;添加水稻稻壳后的草木樨缓冲带对径流中氟离子质量的阻控效率为 91.2%,提升 22.5%。

目前,生物炭已被证实能够通过调节土壤理化性质来降低土壤中未被植物吸收利用的污染物质对环境的危害,并且生物炭由于其自身的多孔结构、巨大的比表面积以及表面富含多种官能团,不仅可以通过

分子间引力(范德华力)对土壤中离子产生交换吸附作用,而且还能通过稳定的化学键对其产生不可逆的吸附^[25]。其作用的机制主要包括:(1)改善土壤结构,提高土壤孔隙度,加强土壤对污染物质的吸附作用,有利于土壤入渗,减少径流量,进而提升质量阻控效率;(2)生物炭具有良好的吸附性能,其对水的吸附力较强,可以有效增加土壤持水能力,对土壤中污染物质迁移特征进行调控^[26];(3)促进植物根系的生长

与延伸,扩大根系对污染物质的吸收范围,促进植物对污染物质的吸收,增加植被生物量。有研究^[27]表明,随着土壤容重的增大,根系生长速度变缓,长度减小,粗度增加,生物量减少,且分布变浅,但水平分布角度增大,严重影响根系的生长发育。生物炭施入土壤后增加土壤田间能力,降低土壤容重,孔隙度随之增大,土壤中水分、空气和养分亦会增多^[28],有利于植物根系的生长与延伸,促进植被吸附污染物质。

表 3 施加不同生物炭下的生态缓冲带地表径流的阻控效率

单位: %

处理	早熟禾	黑麦草	紫花苜蓿	高羊茅	草木樨
CK	91.5±0.5 [*]	72.6±0.2 ^{**}	86.5±0.5 [*]	64.3±0.1 ^{**}	61.7±0.3 ^{**}
CS	94.3±0.3 [*]	93.4±0.4 [*]	92.5±0.5 [*]	70.8±0.2 [*]	85.5±0.5 [*]
RH	96.2±0.2 [*]	57.6±0.4 [*]	82.0±0.2 [*]	84.6±0.4 [*]	89.4±0.4 [*]

注:表中数据为平均值±标准差;*表示显著性水平为 $P<0.05$;**表示显著性水平为 $P<0.01$ 。

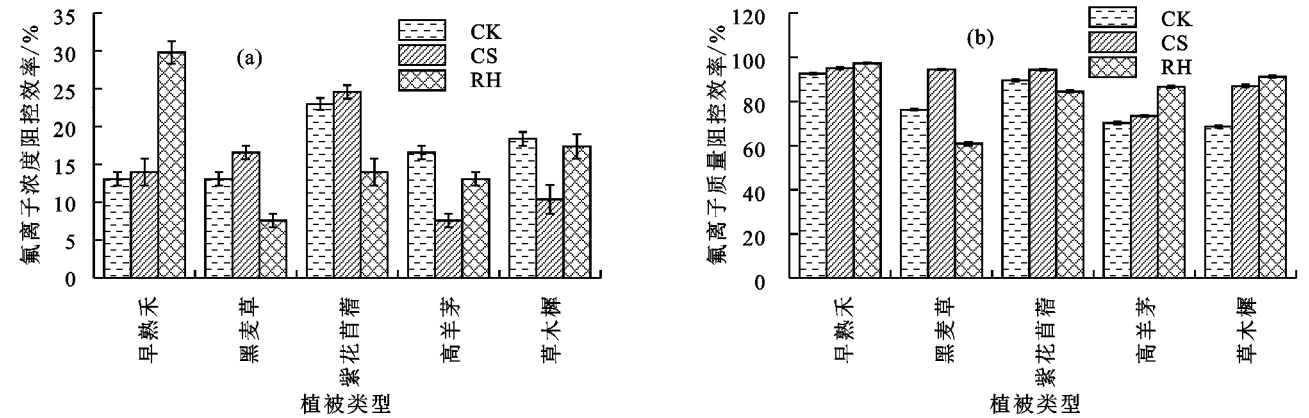


图 5 施加不同生物炭下氟离子阻控效率

本研究中生态缓冲带对于氟化物的阻控效率不仅与是否添加生物炭以及添加的生物炭的种类有关,还与植被类型相关。生物炭虽然可以促进植物生长,提高土壤中的有机质含量,但生物炭作用于不同植被效果不同,且生物炭作用在土壤中易使得土壤 pH 增大,而氟离子在酸性条件下易被去除。生物炭对土壤各种性质的改变及植被影响联合作用导致不同处理的生态缓冲带对径流中氟离子浓度的阻控效率存在较大差异。总体上对于氟离子的阻控效果为施加玉米秸秆生物炭优于施加水稻稻壳生物炭优于未施加生物炭的生态缓冲带。

3 结论

(1)生态缓冲带可以有效拦截径流,不同植被类型生态缓冲带对面源污染物的阻控效率受不同植被类型及其对所拦截污染物质的耐受性影响,这种影响也与植被的生长阶段相关。5 种类型生态缓冲带对径流中氟离子的阻控效果苗期表现为早熟禾>紫花苜蓿>高羊茅>黑麦草>草木樨>空白;后期表现为早熟禾>草木樨>高羊茅>黑麦草>紫花苜蓿>空白。

为 5°时,早熟禾缓冲带对径流中氟离子质量截留效率为 92.6%,浓度提升至 8 mg/L 时,质量截留效率提升至 96.4%,上升 3.8%。缓冲带坡度的大小也是影响生态缓冲带净化效果的重要因素,进水浓度一定时,坡度越小,净化效果越好。当流量为 0.5 L/min,入流浓度为 4 mg/L,坡度由 5°增加至 10°时,缓冲带对径流中氟离子的阻控效率均有不同幅度的降低。受到影响最大的是高羊茅缓冲带,对径流中氟离子质量的截留效率由 70.2%下降至 63.6%,降低 6.6%,浓度截留效率由 16.6%下降至 6.6%,降低 10.0%。

(3)施加不同生物炭前后的生态缓冲带对径流中氟离子的阻控效果也受到植被类型的影响。施加玉米秸秆生物炭后,黑麦草、紫花苜蓿等缓冲带对氟离子浓度的阻控效率分别提高 3.5%,1.3%,质量阻控效率分别提升 18.3%,4.7%。施加水稻稻壳生物炭后,早熟禾缓冲带对氟离子浓度的阻控效率提高 16.6%,质量阻控效率提高 4.7%。

参考文献:
[1] Chen Y C, Zang L, Shen G F, et al. Resolution of the

(2)当流量为 0.5 L/min、入流浓度为 4 mg/L、坡度

- ongoing challenge of estimating nonpoint source neonicotinoid pollution in the Yangtze River basin using a modified mass balance approach[J]. *Environmental Science and Technology*, 2019, 53(5): 2539-2548.
- [2] 付婧,王云琦,马超,等.植被缓冲带对农业面源污染物的削减效益研究进展[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(2): 1-8.
- [3] Zak D, Bronvang B, Carstensen M V, et al. Nitrogen and phosphorus removal from agricultural runoff in integrated buffer zones[J]. *Environmental Science and Technology*, 2018, 52(11): 6508-6517.
- [4] 汤家喜,何苗苗,周博文,等.辽河上游河岸植被过滤带对地下渗流中氮磷截留效果的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(1): 39-45.
- [5] 付婧,王云琦,王玉杰,等.不同入流条件下草本缓冲带对污染物削减作用[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(3): 129-134.
- [6] 杨波.河岸缓冲带对辽河面源污染的阻控作用研究[D]. 长春:吉林大学, 2018.
- [7] 张鸿龄,李天娇,赵志芳,等.辽河河岸植被缓冲带构建及其对固体颗粒物和氮阻控能力[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(7): 2185-2192.
- [8] 陈旭飞,刘通,程炯,等.华南地区草被过滤带对菜地径流、泥沙和磷阻控效果及影响因素[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(2): 377-383.
- [9] 魏忠平,朱永乐,汤家喜,等.模拟黑麦草植被缓冲带对径流中氮、磷以及悬浮颗粒物的截留效果研究[J]. *沈阳农业大学学报*, 2020, 51(3): 328-334.
- [10] Carretta L, Cardinali A, Zanin G, et al. Effect of vegetative buffer strips on herbicide runoff from a non-tilled soil[J]. *Soil Science*, 2017, 182(8): 1-7.
- [11] 乔晓霞,孙熠,刘玉洁.辽宁省典型地区高氟地下水的分布特征及成因分析[J]. *地下水*, 2014, 36(4): 33-34.
- [12] 汤家喜,朱永乐,李梦雪,等.不同生物炭对水中氟离子的吸附特征研究[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(11): 2270-2278.
- [13] 周其家,白晓亮,孙继权.草木樨种植的关键技术[J]. *畜牧兽医科技信息*, 2011(5): 99-100.
- [14] 刘福英,苏琴,高羊茅、早熟禾草坪栽培与管理技术[J]. *青海农技推广*, 2007(4): 43.
- [15] 谭定贵.紫花苜蓿种植推广技术运用[J]. *农民致富之友*, 2013(12): 184.
- [16] Fernández-Ugalde O, Virto I, Bescansa P, et al. No-tillage improvement of soil physical quality in calcareous, degradation-prone, semiarid soils [J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 106(1): 29-35.
- [17] 王敏,吴建强,黄沈发,等.不同坡度缓冲带径流污染净化效果及其最佳宽度[J]. *生态学报*, 2008, 28(10): 4951-4956.
- [18] 庾从蓉,段佩怡.植被过滤带的污染物去除效率研究进展[J]. *水资源保护*, 2018, 34(2): 68-74.
- [19] 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.
- [20] 马艺坤,杨方社,李怀恩,等.不同参数下植被过滤带对径流中农药的净化效果研究[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(5): 876-882.
- [21] 孙晓涛.植被过滤带拦截径流和泥沙效果的 VFSMOD 模型适用性研究[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2014.
- [22] Vol Norris. The use of buffer zones to protect water quality: A review[J]. *Water Resources Management*, 1993, 7(4): 722-726.
- [23] 肖波,喻定芳,赵梅,等.保护性耕作与等高草篱防治坡耕地水土及氮磷流失研究[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(3): 315-323.
- [24] Dorioz J M, Wang D, Poulenard J, et al. The effect of grass buffer strips on phosphorus dynamics: A critical review and synthesis as a basis for application in agricultural landscapes in France[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2007, 117(1): 4-21.
- [25] Kimetu J, Lehmann J. Stability and stabilisation of biochar and green manure in soil with different organic carbon contents [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2010, 48(7): 577-585.
- [26] 褚军,薛建辉,金梅娟,等.生物炭对农业面源污染氮、磷流失的影响研究进展[J]. *生态与农村环境学报*, 2014, 30(4): 409-415.
- [27] Oussible M, Crookston R K, Larson W E. Subsurface compaction reduces the root and shoot growth and grain yield of wheat[J]. *Agronomy Journal*, 1992, 84(1): 34-38.
- [28] Jeffery S, Verheijen F G, Van D, et al. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2011, 144(1): 175-187.