

不同内外部因素对生态缓冲带氮磷 污染净化效果的影响

陈磊^{1,2}, 陈应健^{1,2}, 夏小林^{1,2}, 张靖雨^{1,2}, 高畅^{2,3}, 郭伟玲³, 邹志科⁴

(1.安徽省·水利部淮河水利委员会水利科学研究院, 安徽合肥 230088;

2.安徽省水科学与智慧水利重点实验室, 安徽合肥 230088; 3.安徽理工大学

空间信息与测绘工程学院, 安徽淮南 232001; 4.长江科学院农业水利研究所, 湖北武汉 430010)

摘要: [目的] 探究生态缓冲带(EBZs)在不同内外部因素综合作用下对径流和渗流水体中氮、磷污染物的净化效果,为农业面源污染治理提供优化设计依据。[方法] 采用正交试验,选取植被配置方式、坡度两个内部因素以及入流污染物浓度、入流流量两个外部因素,探究生态缓冲带在不同内外部因素综合作用下对径流和渗流水体中氮、磷污染物的净化效果,并利用极差分析法分析不同内外部因素对生态缓冲带截污能力的影响程度。[结果] 生态缓冲带对地下渗流中 TN, TP 的削减效果(21.31% 和 29.80%)明显优于对地表径流中 TN, TP 的削减效果(16.91% 和 23.04%);复合植被配置生态缓冲带截污效果优于纯草本配置,其中灌木+草本截污效果最佳,对地表径流和地下渗流中 TN 和 TP 的平均削减率分别为 20.16%, 27.24% 以及 24.54%, 33.89%;生态缓冲带不同内外部因素对不同类型污染物的具体影响程度存在显著差异,总体上,由大到小均按照以下顺序排列:植被配置类型>入流污染物浓度>坡度>入流流量。[结论] 对生态缓冲带截污能力影响最大的因素是植被配置类型,但随着缓冲带坡度、入流流量和入流污染物浓度增大,不同植被配置缓冲带对污染物的削减率总体均呈下降趋势。

关键词: 生态缓冲带(EBZs); 影响因素; 面源污染; 径流; 渗流; 削减率

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)05-0001-10 中图分类号: Q948.116, X171.5

文献参数: 陈磊, 陈应健, 夏小林, 等. 不同内外部因素对生态缓冲带氮磷污染净化效果的影响[J]. 水土保持通报, 2025, 45(5): 1-10. Chen Lei, Chen Yingjian, Xia Xiaolin, et al. Influences of different internal and external factors on purification efficiency of nitrogen and phosphorus pollution in ecological buffer zones [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(5): 1-10. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.05.023; CSTR.: 32312.14.stbctb.2025.05.023.

Influences of different internal and external factors on purification efficiency of nitrogen and phosphorus pollution in ecological buffer zones

Chen Lei^{1,2}, Chen Yingjian^{1,2}, Xia Xiaolin^{1,2}, Zhang Jingyu^{1,2}, Gao Chang^{2,3}, Guo Weiling³, Zou Zhike⁴

(1. Anhui and Huaihe River Institute of Hydraulic Research, Hefei,

Anhui 230088, China; 2. Anhui Provincial Key Laboratory of Water Science and Intelligent

Water Conservancy, Hefei, Anhui 230088, China; 3. School of Spatial Information and Surveying

Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China; 4. Agricultural

Water Conservancy Department, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430010, China)

Abstract: [Objective] The purification effect of ecological buffer zones (EBZs) on nitrogen and phosphorus pollutants in surface runoff and seepage water under the combined of different internal and external factors was explored to provide an optimized design basis for the control of agricultural non-point source pollution. [Methods] The purification capacity of EBZs for nitrogen (TN) and phosphorus (TP) pollutants in both runoff and seepage water was evaluated using an orthogonal experimental design, while two internal factors (vegetation configuration

收稿日期: 2025-05-06

修回日期: 2025-06-16

采用日期: 2025-06-17

资助项目: 国家自然科学基金青年项目“考虑水资源‘量-质’可持续性的跨区域粮食贸易系统建模及动态补偿研究: 基于粮食-水-能源-生态视角”(52309001); 安徽省自然科学基金项目(2208085US10; 2408055US009); 安徽省(水利部淮河水利委员会)水利科学研究院青年创新计划项目(KY202201)

第一作者: 陈磊(1993—), 男(汉族), 安徽省滁州市人, 博士, 工程师, 主要从事农业资源与水生态研究。Email: chenlei@ahwrri.org.cn。

and slope gradient) and two external factors (influent pollutant concentration and flow rate) were investigated, and range analysis was applied to quantify their relative contributions to pollutant removal efficiency. [Results] The removal efficiencies of EBZs for TN and TP in seepage water (21.31% and 29.80%, respectively) were significantly higher than those in surface runoff (16.91% and 23.04%, respectively). Composite vegetation configurations showed better pollutant interception effects than pure herbaceous configurations, with the shrub + herb combination achieving the best results. The average removal rates of TN and TP in surface runoff were 20.16% and 27.24%, respectively, and in seepage water were 24.54% and 33.89%, respectively. Meanwhile, the influence degrees of different internal and external factors on various pollutants varied significantly in EBZs, but generally followed the order: vegetation configuration (most dominant) > influent concentration > slope gradient > flow rate (least influential). [Conclusion] The vegetation configuration has the greatest impact on the pollutant interception capacity of EBZs. However, as the slope, inflow rate, and influent pollutant concentration increase, the pollutant removal rates of EBZs with different vegetation configurations generally show a downward trend.

Keywords: ecological buffer zones (EBZs); influencing factors; non-point source pollution; surface runoff; seepage water; reduction rate

农业面源污染是指农业生产活动中,在降水和径流冲刷作用下,化肥等农资中的氮、磷以及其他污染物通过农田地表径流和地下渗流大量进入水体所引起的水体污染,该污染常被视为导致乡村水体水质恶化的主要贡献源^[1],目前,中国农业面源污染的形势非常严峻,化肥施用总量占世界化肥施用总量的1/3,但有效利用率却不到40%^[2],大部分被遗留在土壤中,而后随降水事件发生进入水体,其中氮、磷是农业面源污染主要的污染物。

植被缓冲带是介于水体和陆地之间的植被带,人工生态缓冲带已经被证明是一种可以有效拦截农田面源污染进入河流、成本低廉且富有成效的生态工程措施^[3-6],其净化面源污染物的主要途径是滞留径流中的泥沙及颗粒态污染物,借助植被吸收消纳、土壤吸附以及微生物降解等物理化学过程净化^[7-8]。这一过程受到多种因素影响,既包括生态缓冲带宽度、植被类型、植被种植方式、坡度等内部因素,也包括面源污染浓度、径流流量、径流速度等外部因素。目前对生态缓冲带截污能力的研究多集中于对单个影响因素上,如缓冲带宽度、坡度、植被类型等。Sabater等^[9]通过对欧洲河岸缓冲带的研究发现植被缓冲带对污染物的拦截效果与其宽度呈正相关;李怀恩等^[10]发现宽度10 m的草地缓冲带对地表径流中泥沙、颗粒态氮、颗粒态磷、总氮、总磷的拦截率分别达到89%,90%,87%,70%,85%;吴建强^[11]研究发现相同植被缓冲带,坡度越小,其滞缓径流和土壤水力渗透的能力越强,对氮磷污染物的去除率也越高;Schultz等^[12]的研究表明,乔木植被缓冲带对氮的去除效果优于草本缓冲带。王华玲等^[13]研究表明,灌

草结合缓冲带对总磷的拦截效果要显著高于单独种植草本或灌木的缓冲带。然而,生态缓冲带截污能力受到多种因素影响,除内部因素外,面源污染浓度、径流流量等外部因素也不容忽视,截至目前,生态缓冲带截污能力受到内外部因素的综合影响程度尚不明确,有必要对相关问题进行探索和研究。

本文利用自行设计的生态缓冲带污染物净化装置开展试验研究。试验选取植被配置方式、坡度两个内部因素以及入流污染物浓度、入流流量两个外部因素采用正交试验的试验设计方法,系统探究生态缓冲带在不同内外部因素综合作用下对径流和渗流水体中氮、磷污染物的净化效果,并利用极差分析法分析不同内外部因素对生态缓冲带截污能力的影响程度,其结论可为开展生态缓冲带农业面源污染防治研究和应用提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验基地概况

试验在2024年5—10月于安徽省蚌埠市固镇县的新马桥农水水保综合试验站开展,该站位于淮北平原地区的中南部(33°09'N, 117°22'E,海拔高度19.7 m),试验站多年平均气温14.3℃,平均降雨量911 mm,蒸发量917 mm。

1.2 植被配置组合

地表径流沿河岸缓冲带流动方向通常需要依次通过灌木、草本植物、挺水植物。本研究在进行植被选择时参考河岸带植物实际状况,对植物的选取标准为:①尽可能挑选淮北平原本土植物,或已通过大面积种植验证、适应当地气候与土壤条件的植

物;②具有较好耐热、耐旱性、适应性的木本、草本、挺水植物,成活率高;③对面源污染有较好的阻控效果,且具有一定的水土保持效果;④种植及养护成本低,且具有一定的观赏价值。

根据调查资料,本试验选取适宜当地环境且在区域生态工程中应用广泛的 2 种草本植物[马尼拉草(*Zoysia matrella*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)],1 种挺水植物[黄菖蒲(*Iris pseudacorus* L.)]和 1 种灌木[金边黄杨(*Euonymus japonicus*)]4 种植物构建生态缓冲带。基于植物选择,设置纯草本、灌木+草本、草本+挺水、灌木+草本+挺水等 4 种植被配置模式

(植被面积配置比例详见表 1),其中进行草本植物设置时考虑平原地区缓冲带植被自然生长情况,设置为狗牙根与马尼拉草 1:1 等比混播。试验过程中需要定期对模拟槽植物进行浇水与除草,植物生长过程不施肥,避免因施肥输入试验以外的氮素和磷素,待植被覆盖度达到 90% 左右开始试验。试验开始前 1 天使用相同来源的河水低流速冲刷模拟槽 30 min 至模拟槽出口流量稳定,保证模拟槽土壤水分接近饱和(土壤含水率为 21.53%),相同环境放置 1 d 后再开展试验,以确保每次试验开始前土壤含水率相同。

表 1 生态缓冲带植物配置比例

Table 1 Proportion of plant configuration in ecological buffer zone

类型	植被配置	面积配置比例	面积/m ²			
			灌木	草本植物	挺水植物	总面积
A	草本植物	1	0	0.6	0	0.6
B	灌木+草本植物	1:2	0.2	0.4	0	0.6
C	草本植物+挺水植物	2:1	0	0.4	0.2	0.6
D	灌木+草本植物+挺水植物	1:1:1	0.2	0.2	0.2	0.6

1.3 试验设计

本研究的目标是分析生态缓冲带在不同内外部因素综合作用下的对径流和渗流水体中氮、磷污染物的净化效果,因此需要探究在不同坡度、径流流量和面源污染浓度条件下,不同植被配置生态缓冲带对氮、磷等主要面源污染物的削减效果。因此,试验方案以 4 种不同植被配置为基础,采用正交试验的方式设计了入流流量、入流污染物浓度和缓冲带坡度 3 种因子对生态缓冲带削减面源污染模拟试验(表 2)。3 种因子都设有高、中、低 3 个试验水平,各因子间相互独立且不考虑交互作用,每组试验设置 3 次重复试验。其中,径流流量因子高、中、低水平分别为 0.24, 0.16 和 0.08 L/s,缓冲带坡度因子高、中、低水平分别为 20°, 15° 和 10°,污染物浓度因子高、中、低 3 个试验水平主要用于模拟淮北平原总氮(TN)、总磷(TP)两种典型污染物不同程度的面源污染状况(表 3),采用人工配置方式制备,即通过添加农田施肥时常用的中性肥料尿素[CO(NH₂)₂]与复合肥料磷酸二氢钾(KH₂PO₄),与水按一定比例均匀混合制成。正交试验数据分析主要有极差分析与方差分析两种分析方法,其中极差分析又称直观分析法,具有计算简单、易于理解等优点,是正交试验结果分析最常用的方法,因此本研究使用极差分析法对试验结果进行分析。

表 2 生态缓冲带模拟冲刷试验方案

Table 2 Simulation Scheme for ecological buffer zone

编号	植被配置	坡度	流量	污染物浓度
1	A	低	低	低
2	A	中	中	中
3	A	高	高	高
4	A	高	低	高
5	B	低	中	高
6	B	中	低	中
7	B	高	低	低
8	B	低	高	低
9	C	低	高	中
10	C	中	高	低
11	C	高	低	高
12	C	高	中	低
13	D	低	低	低
14	D	中	高	中
15	D	高	中	高
16	D	低	高	高

表 3 面源污染物进水浓度

Table 3 Pollutant concentration in inflows 单位:mg/L

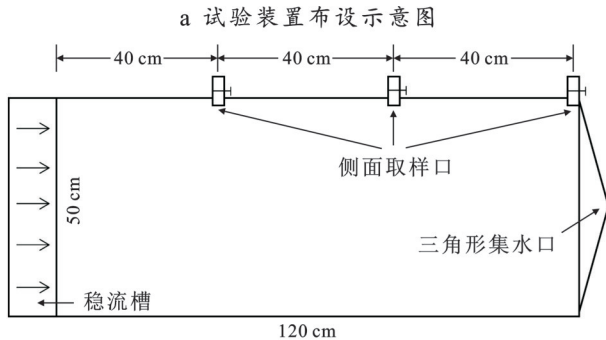
处理组	总氮	总磷
低浓度	3.49±0.05	0.54±0.03
中浓度	5.61±0.12	0.74±0.01
高浓度	8.56±0.02	0.89±0.02

注:数值为平均值±标准误。

1.4 试验装置

如图1所示,试验装置包括供水系统与模拟槽两部分,供水系统采用两个容积大小均为500 L的聚乙烯材质塑料桶组成,其中1个为搅拌桶,另1个为供水桶。搅拌桶底部装有搅拌器与水泵1个,供水桶中装有可调节出水流量大小的水泵1个,用于试验供水。模拟槽长宽高分别为120 cm×50 cm×45 cm,由4 mm厚钢板制作而成,四周采用钢箍加固,底部连接可拆卸的钢质支架,支架按坡度分为高、中、低3种

类型,对应试验设计的坡度大小分别为20°,15°和10°。沿径流流动方向,模拟槽前端设稳流槽,末端设置两侧高度为2 cm的三角形集水口,用于收集地表径流水样。装置侧面间隔40 cm设取样口,取样口与集水管连接,用于汇集地表径流与土壤渗流。模拟槽从底部40 cm深到土壤表面,每隔20 cm设有一个取样口,其中最上层的集水管半裸露于土壤表面,用于收集地表径流,中、下层集水管用于收集试验渗流(图1)。



注:侧面取样口分为三层,最上层收集地表径流,中、下层收集渗流。

b 试验装置布置场景



图1 试验装置示意图与实物图

Fig.1 Schematic and physical diagram of experimental equipment

为了更加准确地模拟生态缓冲带植被的实际种殖效果,模拟槽中填充基质选择的是淮北平原河岸带和农业区典型的砂姜黑土,填土前首先在底部铺设一层厚度为2 cm的碎石,并在碎石上铺一层可渗水土工布,防止土壤颗粒流失堵塞透气孔,而后在上

层填充厚度约为40 cm的砂姜黑土。实验室分析结果表明砂姜黑土土壤质地为壤质黏土(砂粒13.79%,粉粒51.02%,黏粒35%),土体深厚且黏重板实,遇水胀缩性大,有机质与微量元素含量较低。土壤理化性质详见表4。

表4 模拟槽填充土壤的理化性质

Table 4 Physical and chemical properties of soil filled in experimental equipment

项目	土层深度/ cm	容重/ (g·cm ⁻³)	含水率/%	孔隙度/%	土壤酸碱度	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)
指标值	0—20	1.24	21.53	51.48	8.2	0.92	0.53	13.57	5.3

1.5 污染物削减率

本研究主要用于研究平原沟渠生态缓冲带对氮磷污染的净化效果,因此,每组试验单次冲刷总时长为1 h,每间隔6 min进行一次径流与渗流取样,每次取样采集500 ml水样,每次取样采集3个平行样品,带回实验室置于冰箱中1~5℃冷藏保存,并及时测定。选取总氮(TN)、总磷(TP)两项水质指标作为氮磷污染代表性指标。其中,TN采用碱性过硫酸钾氧化消解—紫外分光光度法(GB 11894—89)测定,检出限为0.05 mg/L;TP采用钼酸铵分光光度法(GB 11893—89)测定,检出限为0.01 mg/L。

本研究以削减率作为判别截污能力差异的标准,削减率计算公式为:

$$R = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100\%$$

式中: R 为污染物的削减率(%); C_0 为污染物的初始浓度(mg/L); C 为取样处污染物的浓度(mg/L)。

2 结果与分析

2.1 不同内部因素对生态缓冲带截污能力影响

2.1.1 不同植被配置方式的影响

本文首先分析了植被配置方式、坡度两个内部因素以及入流污染物浓度、入流流量两个外部因素对生态缓冲带截污能力影响的综合平均值。图2为不同配置模式下生态缓冲带对地表径流和地下渗流中污染物的削减能力。由图2可知,植被配置A,B,

C, D对地表径流中TN和TP的平均削减率分别为10.94%, 20.16%, 18.51%, 18.01%以及15.90%, 27.24%, 24.79%, 24.23%,对地下渗流中TN和TP的平均削减率分别为14.31%, 24.54%, 22.61%, 23.76%以及21.34%, 33.89%, 32.76%, 31.20%。从植被配置模式来看,复合植被配置生态缓冲带对污染物的净化效果比纯草本植物更好,其中植被配置B(灌木+草本植物)对地表径流和地下渗流中污染物的平均削减效果均最好,植被配置B对地表径流中TN, TP的平均削减率分别为20.16%和27.24%,对地下渗流中TN, TP的平均削减率分别为24.54%, 33.89%。

从植被类型来看,相同宽度状况下灌木、草本、挺水3种植被类型对TN污染物的削减能力按从大到小排列为:灌木>挺水>草本,而对TP污染物的削减能力排序为:灌木>草本>挺水,其中灌木对

TN和TP的平均削减效果均最好。此外,各植被配置对地表径流TN污染物和TP污染物的平均削减率分别为16.91%和23.04%,而对地下渗流TP污染物和TN污染物的平均削减率分别为21.31%和29.80%。从污染物载体来看,无论植被配置如何,生态缓冲带对地下渗流中污染物的削减效果明显好于对地表径流中污染物的削减效果,这可能是由于地下渗流中污染物质经过土壤过滤、植物根系吸收等多重作用,其污染物去除能力显著增强^[11];从污染物种类来看,各植被配置对地表径流和地下渗流中TP污染物的削减效果明显好于对TN污染物的削减效果,这可能是氮素与磷素的流失形态差异导致的。氮素在径流中主要是通过有机氮、铵离子及氨的形式存在,而磷素则更容易在土壤中被固定,在径流中主要是以泥沙结合态存在,这些结果与黄沈发等^[14]、刘燕等^[15]、杨帆等^[16]的研究结论一致。

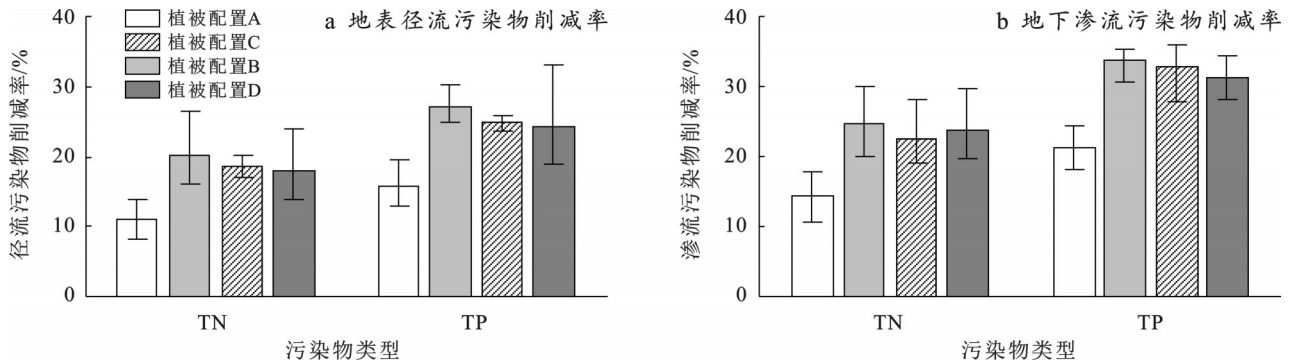


图2 不同植被配置方式对生态缓冲带截污能力的影响

Fig.2 Effects of different vegetation configuration pattern on purification efficiency of ecological buffer zones

2.1.2 不同坡度的影响

图3为不同坡度条件下生态缓冲带对地表径流和地下渗流中污染物的削减能力。由图3可知,低(10°)、中(15°)、高(20°)3种坡度下生态缓冲带对地表径流中TN和TP的平均削减率分别为18.08%, 16.93%, 15.73%以及24.91%, 23.32%, 20.97%,对地下渗流中TN和TP的平均削减率分别为22.57%, 21.21%, 20.11%以及31.3%, 31.79%, 26.96%。地表径流TN和TP削减率在低-中坡度范围内每增加 1° 的单位变化率分别为0.23%和0.32%,而在中-高坡度范围内分别为0.24%和0.47%;地下渗流TN和TP削减率在低-中坡度范围内每增加 1° 的单位变化率分别为0.27%和-0.1%,而在中-高坡度范围内分别为0.22%和0.97%。总体上结果表明生态缓冲带坡度越低,其对污染物的削减效果越强,且随坡度增大削减效果加速下降,表明为了维持较高的污染物削减率,可能需要尽量降低缓冲带坡度。从污染物载体来看,缓冲带坡度变化对削减地下渗流中污染

物的影响要略高于削减地表径流中污染物的影响,但与此同时也更易受其他因素影响导致削减率变化的不确定性较大。

2.2 不同外部因素对生态缓冲带截污能力影响

2.2.1 不同入流流量的影响

图4为不同入流流量条件下生态缓冲带对地表径流和地下渗流中污染物的削减能力。由图4可以看出,低(0.08 L/s)、中(0.16 L/s)、高(0.24 L/s)3种入流流量下生态缓冲带对地表径流中TN和TP的平均削减率分别为17.67%, 15.97%, 16.78%以及24.46%, 21.54%, 22.61%,对地下渗流中TN和TP的平均削减率分别为22.57%, 21.21%, 20.11%以及31.3%, 31.79%, 26.96%。地表径流TN和TP削减率在低流量—中流量范围内每增加 0.01 L/s 的单位变化率分别为0.21%和0.36%,而在中流量-高流量范围内分别为-0.1%和-0.13%;地下渗流TN和TP削减率在低流量—中流量范围内每增加 1° 的单位变化率分别为0.11%和0.04%,而在中流量—高流量

范围内分别为 0.08% 和 -0.22%。总体上结果显示削减率最佳的入流流量为低流量(0.08 L/s),但入流流量对生态缓冲带污染物的削减效果的影响不确定性较强。这可能是由于较低的入流流量可以使污染物在缓冲带中存留更多的时间,入流流量增大会导致部分污染物未经缓冲带植被的削减而直接流出,

降低了缓冲带的净化效率,而高流量的情景可能会产生更大的土壤冲刷效果,增强了土壤对污染物的吸附能力,反而在一定程度上增强了缓冲带的净化效率,表明为了维持较高的污染物削减率,可能需要控制缓冲带具有合适的入流流量,或根据入流流量选择更合适的缓冲带类型。

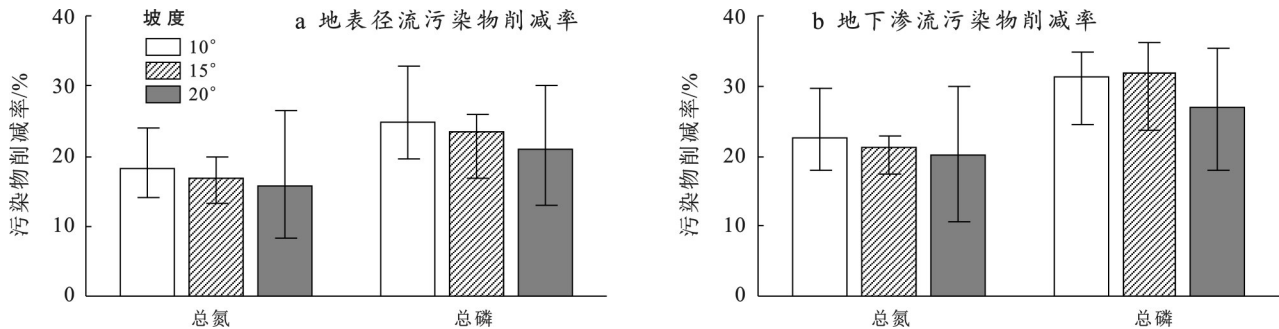


图 3 不同坡度对生态缓冲带截污能力的影响

Fig.3 Effects of different slopes on purification efficiency of ecological buffer zones

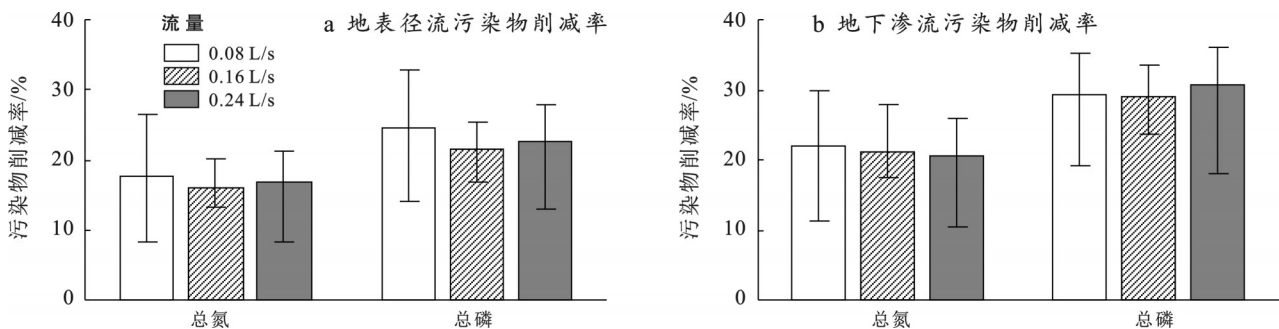


图 4 不同入流流量对生态缓冲带截污能力的影响

Fig.4 Effects of different inflows on purification efficiency of ecological buffer zones

2.2.2 不同入流污染物浓度的影响

图 5 为不同入流污染物浓度条件下生态缓冲带对地表径流和地下渗流中污染物的削减能力。由表 5 可知,低、中、高 3 种入流污染物浓度下生态缓冲带对地表径流中 TN 和 TP 的平均削减率分别为 20.98%, 16.25%, 13.28% 以及 27.00%, 22.76%, 19.25%, 对地下渗流中 TN 和 TP 的平均削减率分别为 25.57%, 20.48%, 17.59% 以及 33.08%, 31.24%, 25.55%。地表径流 TN 削减率在低流量—中流量和中流量—高流量范围内每增加 1 mg/L 的单位变化率分别为 2.23% 和 1.00%, 而 TP 削减率每增加 0.1 mg/L 的单位变化率分别为 2.12% 和 2.34%; 地表径流 TN 削减率在低流量—中流量和中流量—高流量范围内每增加 1 mg/L 的单位变化率分别为 2.40% 和 0.98%, 而 TP 削减率每增加 0.1 mg/L 的单位变化率分别为 0.92% 和 3.80%。总体上结果显示缓冲带在低浓度条件下对污染物削减效果较好,

且削减效果随污染物浓度的增加呈显著下降趋势,入流浓度越高,生态缓冲带对污染物的削减效果越弱。这或许是由于当污染物浓度更大时,缓冲带植被截留污染物的量比中、低浓度先达到饱和状态,从而降低了缓冲带的净化效率,表明着在高浓度污染条件下,为了维持较高的削减率,可能需要更宽的缓冲带。

3 讨论

3.1 各因素对生态缓冲带截污能力的影响程度

本试验获得的多因素影响下各类型生态缓冲带对污染物的削减能力结果(图 6)。由图 6 可以看出,在多重内外部因素综合作用下,生态缓冲带对地表径流 TN 的削减率介于 8.31%~26.55%,削减率最高的组合为植被配置 B+高坡度+低入流流量+低入流浓度;生态缓冲带对地下渗流 TN 的削减率介于 10.55%~29.87%,削减率最高的组合为植被配置

B+高坡度+低入流流量+低入流浓度;生态缓冲带对地表径流 TP 的削减率介于 13.06%~30.17%,削减率最高的组合为植被配置 B+高坡度+低入流流

量+低入流浓度;生态缓冲带对地下渗流 TP 的削减率介于 18.03%~35.99%,削减率最高的组合为植被配置 C+中坡度+高入流流量+低入流浓度。

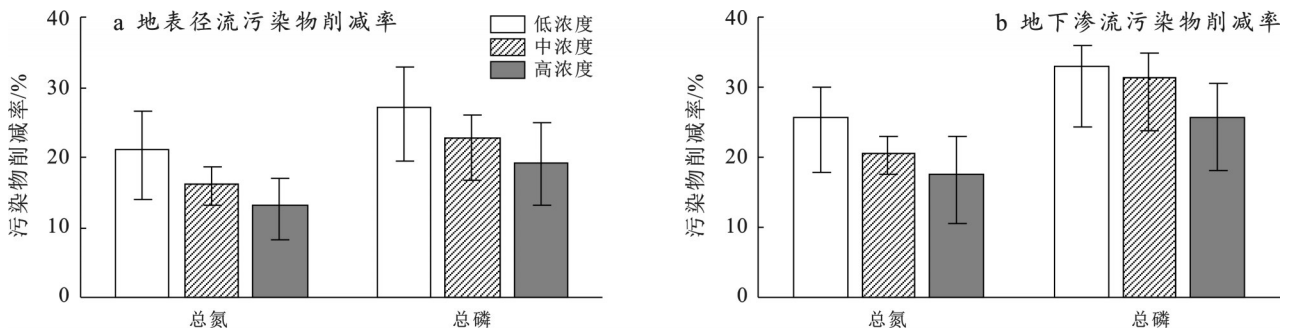


图 5 不同入流污染物浓度对生态缓冲带截污能力的影响

Fig.5 Effects of different influent pollutant concentrations on purification efficiency of ecological buffer zones

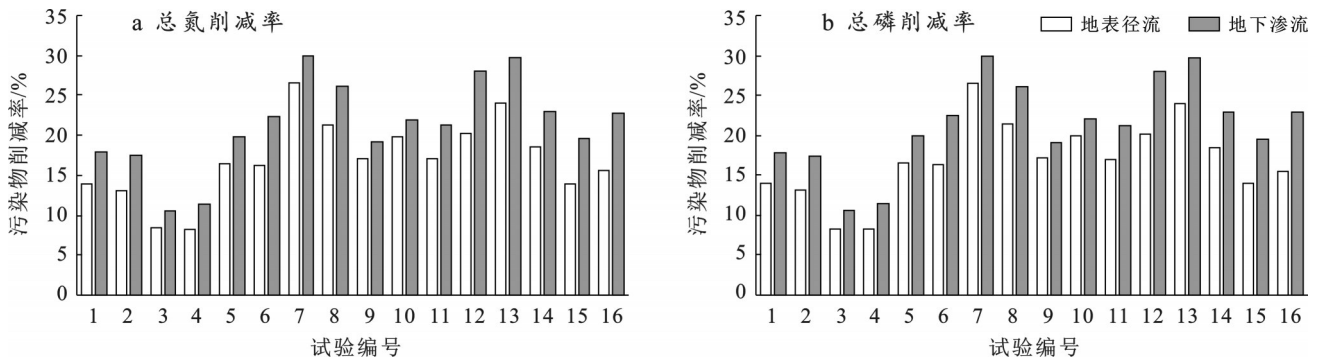


图 6 多因素影响生态缓冲带截污能力

Fig.6 Multiple factors affecting purification efficiency of ecological buffer zones

采用极差分析法对正交试验结果进行分析,计算内外部因素的综合平均值以及极差 R,获得影响生态缓冲带截污能力的主次因素顺序以及最优水平组合(表 5)。结果表明,虽然生态缓冲带不同内外部因素对不同类型污染物的具体影响程度存在差距,但总体上由大到小顺序为:植被配置类型>入流污染物浓度>坡度>入流流量,也就是说生态缓冲带截污能力影响最大的是植被配置类型,在往后研究工作中可以参照该顺序进行深入试验研究;随着缓冲带坡度、入流流量和入流污染物浓度增大,不同植被配置缓冲带对污染物的削减率总体均呈下降趋势;从最优水平组合而言,除对地下渗流 TP 的削减外,生态缓冲带对其他类型污染物削减的最优水平组合均为植被配置类型 B+低坡度+低流量+低浓度。

3.2 研究不足与展望

本研究基于正交试验设计方法系统探究了生态缓冲带在不同内外部因素综合作用下对径流和渗流水体中氮、磷污染物的净化效果。但受限于植被配置方式、坡度、入流污染浓度以及入流流量等不同类型因素,难以通过统一度量的方式开展精细研究,研究

获得的关于生态缓冲带净化效果的结论都基于本次试验的固定设计而获得,虽然与韩旭等^[17]、孙东耀^[18]以及吴尧等^[19]关于生态缓冲带净化效果的研究结论类似,但依然存在一定的局限性和尺度差异性^[20-21]。即,植被配置类型>入流污染物浓度>坡度>入流流量的影响顺序应该理解为在 120 cm 宽的生态缓冲带上,40 cm 草本植物转换为:灌木或水生植物>入流污染物浓度增加 2 mg/L(TN)或 0.2 mg/L(TP)>坡度升高 5°>入流流量增加 0.08 L/s。未来研究可以进一步细化各类型因素的试验组别,从而为生态缓冲带的科学高效应用提供较为完备的数据支撑。

此外,受限于试验设计,本文仅研究了植被配置方式、坡度、入流污染浓度以及入流流量 4 个内外部因素对生态缓冲带截污能力的影响程度,而实际构建缓冲带过程中,还可能存在土壤、气候等更多影响缓冲带截污能力的因素。因此,日后还需要结合工程实际开展长期研究,提出不同条件下的相关结论,真正确定影响生态缓冲带截污能力的相关因素的贡献度,本研究所采用的研究方法也可为开展此类研究提供技术借鉴。

表 5 基于极差分析法的主次影响因素顺序和最优水平组合

Table 5 Order and optimal level combination of primary and secondary influencing factors based on range analysis method

类型	因素	水平分类	削减率/%	最优水平	极差(R)	主次因素顺序	最优水平组合
地表径流全氮削减率	内部因素 1	A	10.94	B	9.22%	植被配置类型>入流污染物浓度>坡度>入流流量	植被配置类型 B+低坡度+低流量+低浓度
		B	20.16				
		C	18.54				
		D	18.01				
	内部因素 2	低坡度	18.08	低	2.35%		
		中坡度	16.93				
		高坡度	15.73				
	外部因素 1	低流量	17.67	低	1.70%		
		中流量	15.97				
	外部因素 2	高流量	16.78	低	7.70%		
		低浓度	20.98				
		中浓度	16.25				
地下渗流全氮削减率	内部因素 1	A	14.31	B	10.23%	植被配置类型>入流污染物浓度>坡度>入流流量	植被配置类型 B+低坡度+低流量+低浓度
		B	24.54				
		C	22.61				
		D	23.76				
	内部因素 2	低坡度	22.57	低	2.46%		
		中坡度	21.21				
		高坡度	20.11				
	外部因素 1	低流量	22.07	低	1.48%		
		中流量	21.22				
	外部因素 2	高流量	20.60	低	7.98%		
		低浓度	25.57				
		中浓度	20.48				
地表径流全磷削减率	内部因素 1	A	15.90	B	11.35%	植被配置类型>入流污染物浓度>坡度>入流流量	植被配置类型 B+低坡度+低流量+低浓度
		B	27.24				
		C	24.79				
		D	24.23				
	内部因素 2	低坡度	24.91	低	3.93%		
		中坡度	23.32				
		高坡度	20.97				
	外部因素 1	低流量	24.46	低	2.91%		
		中流量	21.54				
	外部因素 2	高流量	22.61	低	7.76%		
		低浓度	27.00				
		中浓度	22.76				
地下渗流全磷削减率	内部因素 1	A	21.34	B	12.55%	植被配置类型>入流污染物浓度>坡度>入流流量	植被配置类型 B+低坡度+高流量+低浓度
		B	33.89				
		C	32.76				
		D	31.20				
	内部因素 2	低坡度	31.30	低	4.34%		
		中坡度	31.79				
		高坡度	26.96				
	外部因素 1	低流量	29.32	高	1.80%		
		中流量	29.00				
	外部因素 2	高流量	30.80	低	7.54%		
		低浓度	33.08				
		中浓度	31.24				
		高浓度	25.55				

4 结论

(1) 生态缓冲带对地下渗流中TN, TP的削减效果(21.31%和29.80%)明显优于对地表径流中TN, TP的削减效果(16.91%和23.04%);复合植被配置生态缓冲带截污效果优于纯草本配置,其中灌木+草本截污效果最好,对地表径流和地下渗流中TN和TP的平均削减率分别为20.16%,27.24%以及24.54%,33.89%,在宽度相同情况下,灌木对污染物的削减能力高于挺水植物和草本植物;从污染物载体来看,生态缓冲带对地下渗流中污染物的削减效果明显好于对地表径流;从污染物种类来看,生态缓冲带对TP污染物的削减效果明显优于对TN污染物。

(2) 依据极差分析法分析正交试验结果可知,生态缓冲带不同内外部因素对不同类型污染物的具体影响程度存在差异,但总体上由大到小均按排列为:植被配置类型>入流污染物浓度>坡度>入流流量。从最优水平组合来说,除对地下渗流TP的削减外,生态缓冲带对其他类型污染物削减的最优水平组合均为植被配置类型B+低坡度+低流量+低浓度。

(3) 本研究获取不同内外部因素对生态缓冲带截污能力影响程度的结论存在一定程度的不确定性,仅可用于代表在120 cm宽的纯草本生态缓冲带上,40 cm草本植物转换为:灌木(或水生植物)>入流污染物浓度增加2 mg/L(TN)[或0.2 mg/L(TP)]>坡度升高5°>入流流量增加0.08 L/s。今后还需要结合工程实际开展长期研究,提出不同条件下的相关结论,真正确定影响生态缓冲带截污能力的相关因素的贡献度。

参考文献(References)

- [1] 王一格,王海燕,郑永林,等.农业面源污染研究方法与控制技术研究进展[J].中国农业资源与区划,2021,42(1):25-33.
Wang Yige, Wang Haiyan, Zheng Yonglin, et al. Advances in research methods and control technologies of agricultural non-point source pollution: A review [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021,42(1):25-33.
- [2] 张馥林,陈美球,刘桃菊.政府推广、社会网络与农户测土配方施肥技术采纳行为[J].中国农业资源与区划,2024,45(5):133-143.
Zhang Fulin, Chen Meiqiu, Liu Taoju. Government extension, social networks and farmer adoption behavior of soil testing and fertilizer application technology [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2024,45(5):133-143.
- [3] 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]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 2007, 43(5):1108-1116.
- [4] 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 Xiaobo, Chen Chuansheng, 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.
- [5] 李晓娜,张国芳,武美军,等.不同植被过滤带对农田径流泥沙和氮磷拦截效果与途径[J].水土保持学报,2017,31(3):39-44.
Li Xiaona, Zhang Guofang, Wu Meijun, et al. Interception ways and effects of grass filter strips on sediment, nitrogen and phosphorus in agricultural runoff [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017,31(3):39-44.
- [6] 田玉龙.水系连通及水美乡村建设需要处理好的问题及建议[J].中国水利,2021(12):17-19.
Tian Yulong. Issues and recommendations of construction of water system interconnection and water-beauty countryside [J]. China Water Resources, 2021(12):17-19.
- [7] 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.
Fu Jing, Wang Yunqi, Ma Chao, et al. Research progress on the effects of vegetation buffer zone on reducing agricultural non-point pollution [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(2):1-8.
- [8] Liu Xingmei, Zhang Xuyang, Zhang Minghua. 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.
- [9] Sabater S, Butturini A, Clement J C, et al. Nitrogen removal by riparian buffers along a European climatic gradient: Patterns and factors of variation [J]. Ecosystems, 2003,6(1):20-30.
- [10] 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 Huaen, Pang Min, Yang Yinqun, et al. Experimental study of clarification for vegetative filter strips to sedi-

- ment in surface runoff [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2009, 28(6):176-181.
- [11] 吴建强. 不同坡度缓冲带滞缓径流及污染物去除量化[J]. *水科学进展*, 2011, 22(1):112-117.
Wu Jianqiang. Quantitative study of the damping effect of buffer strips with different slopes on runoff and pollutant removal efficiency [J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(1):112-117.
- [12] Schultz R C, Collettil J P, Isenhardt T M, et al. Design and placement of a multi-species riparian buffer strip system [J]. *Agroforestry Systems*, 1995, 29 (3) : 201-226.
- [13] 王华玲, 赵建伟, 程东升, 等. 不同植被缓冲带对坡耕地地表径流中氮磷的拦截效果[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(9):1730-1736.
Wang Hualing, Zhao Jianwei, Cheng Dongsheng, et al. Nitrogen and phosphorus removal efficiency of different vegetative buffer strips on surface runoff from sloping land [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(9):1730-1736.
- [14] 黄沈发, 唐浩, 鄢忠纯, 等. 3种草皮缓冲带对农田径流污染物的净化效果及其最佳宽度研究[J]. *环境污染与防治*, 2009, 31(6):53-57.
Huang Shenfa, Tang Hao, Yan Zhongchun, et al. Sward riparian buffer zone for runoff clarification and nutrient removal [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2009, 31(6):53-57.
- [15] 刘燕, 夏品华, 郑钧宁, 等. 河岸缓冲带植物配置模式对面源污染物的净化效果[J]. *贵州农业科学*, 2014, 42 (10):248-251.
Liu Yan, Xia Pinhua, Zheng Junning, et al. Effects of different plant configuration modes of riparian buffer strips on runoff purification [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2014, 42(10):248-251.
- [16] 杨帆, 高大文, 高辉. 草本缓冲带优化配置对氮磷的去除效果[J]. *东北林业大学学报*, 2011, 39(2):57-59.
Yang Fan, Gao Dawen, Gao Hui. Effects of nitrogen and phosphorus removal by optimizing the configuration of herbaceous buffer strips [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2011, 39(2):57-59.
- [17] 韩旭, 杜崇, 陈嘉硕, 等. 河岸缓冲带植被布局对氮流失的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(16):172-179.
Han Xu, Du Chong, Chen Jiashuo, et al. Effects of riparian buffer zone vegetation layout on nitrogen loss [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(16):172-179.
- [18] 孙东耀. 不同植被河岸缓冲带系统对氮磷污染物的拦截过程研究[D]. 福建 福州: 福建师范大学, 2018.
Sun Dongyao. Study on the intercepting process of nitrogen and phosphorus pollutants in the buffer zone system of different vegetation riparian [D]. Fuzhou, Fujian: Fujian Normal University, 2018.
- [19] 吴尧. 河岸植被缓冲带植被类型与宽度对水质净化效益的影响[J]. *现代园艺*, 2021(13):49-51.
Wu Yao. Effects of vegetation types and widths in riparian vegetation buffer zone on water purification benefits [J]. *Contemporary Horticulture*, 2021(13):49-51.
- [20] 王琼, 范康飞, 范志平, 等. 河岸缓冲带对氮污染物削减作用研究进展[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(2):665-677.
Wang Qiong, Fan Kangfei, Fan Zhiping, et al. Nitrogen pollutant removal by riparian buffer zone: A review [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(2):665-677.
- [21] 曹宏杰, 焉志远, 杨帆, 等. 河岸缓冲带对氮磷污染消减机理及其影响因素研究进展[J]. *国土与自然资源研究*, 2018(3):46-50.
Cao Hongjie, Yan Zhiyuan, Yang Fan, et al. The review on removal mechanism of nitrogen and phosphorus pollutant and its influencing factors of riparian buffer strips [J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2018 (3):46-50.