

大清河流域河岸植被带污染物净化能力研究

赵奕博^{1,3,4}, 尹钊², 史常青^{1,3,4}, 于洋^{1,3,4}, 张艳^{1,3,4}

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;2.河北省承德市滦平县政府办,河北 承德 068250;

3.北京林业大学水土保持国家林业和草原局重点实验室,北京 100083;

4.北京林业大学北京市水土保持工程技术研究中心,北京 100083)

摘要:为了解决白洋淀上游河岸带植被类型单一、生态功能低下等问题,从河岸植被带截留、净化面源污染物的生态功能定位出发,选取2种草本和1种灌木为研究对象,通过模拟径流冲刷试验,研究河岸植被带对氮、磷及泥沙污染物的净化效果。结果表明:(1)与单一灌木相比,单一草本的净化效率更好,狗牙根(*Cynodon dactylon*)的总磷、总氮和泥沙的净化效率最佳,分别为10.88%,6.96%,34.20%;黑麦草(*Lolium perenne*)对氨氮和硝氮有较好的净化效果,分别为10.11%和9.54%;(2)在多组植物组中,胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、狗牙根、黑麦草的草灌组合净化效率较好,在各项指标平均值上分别较裸土组提高了13.31%,10.84%,9.64%,12.36%,46.43%;(3)灌草和混草的植物组合对5项污染物指标的净化效率均较高,混植组的去除效果优于单一植物组。河岸植被带对面源污染有着一定的净化效果,其中灌草和混草组合的净化效果较好,胡枝子、狗牙根、黑麦草的草灌植物组合表现出最好的净化效果。

关键词:河岸植被带;植物配置模式;面源污染;氮磷净化效率;泥沙截留效率

中图分类号:X524

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)05-0130-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2022.05.018

Study on Pollutant Purification Capacity of Riparian Vegetation Zone in Daqing River Basin

ZHAO Yibo^{1,3,4}, YIN Zhao², SHI Changqing^{1,3,4}, YU Yang^{1,3,4}, ZHANG Yan^{1,3,4}

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2.Luanping County Government Office of Chengde City, Hebei Province, Chengde 068250; 3.Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

4.Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: In order to solve the problems of single vegetation type and low ecological function in the riparian zone in the upper reaches of Baiyangdian Lake, starting from the ecological function orientation of intercepting and purifying non-point source pollutants in the riparian vegetation zone, two kinds of herbs and one kind of shrub were selected as the research object to study the purification effect of riparian vegetation zone on nitrogen, phosphorus and sediment pollutants through a simulated runoff scouring test. The results were as follows: (1) Compared with single shrub, the purification efficiency of single herb was better, and the purification efficiency of total phosphorus, total nitrogen and sediment of *Cynodon dactylon* was the best, which were 10.88%, 6.96% and 34.20% respectively; *Lolium perenne* had good purification effects on ammonia nitrogen and nitrate nitrogen, which were 10.11% and 9.54% respectively; (2) Among the multiple plant configurations, the purification efficiency of grass shrub combination of *Lespedeza bicolor*, *Cynodon dactylon* and *Lolium perenne* was better, and the average values of various indexes were increased by 13.31%, 10.84%, 9.64%, 12.36% and 46.43% respectively compared with the bare soil; (3) The plant combination of shrub&herbs and mixed herbs had higher purification efficiency for five pollutant indexes, and the removal effect of mixed plant group was better than that of single plant group. In conclusion, riparian vegetation zone

收稿日期:2022-01-13

资助项目:国家自然科学基金项目(41907047);国家科技重大专项(2018ZX07110)

第一作者:赵奕博(1998—),男,硕士研究生,主要从事生态系统服务研究。E-mail:gszhaoyibo@163.com

通信作者:张艳(1987—),女,讲师,博士,主要从事水土保持工程研究。E-mail:bltjzhangyan@163.com

had purification effect on surface source pollution, among which the combination of shrub&herbs and mixed herbs had a better purification effect. The combination of grass and shrub plants of *Lespedeza bicolor*, *Cynodon dactylon* and *Lolium perenne* showed the best purification effect.

Keywords: riparian vegetation zone; plant configuration; non-point source pollution; purification efficiency of nitrogen and phosphorus; interception efficiency of sediment

当前,全球范围内近 50% 的地表水资源已经受到面源污染的影响,因种植业的化肥、农药等要素的过量施用以及养殖业畜禽粪便的乱排乱放,出现了氮、磷、钾等养分的过剩,超过了农田的养分负荷,这些遗留在土壤中的过剩养分在雨水等作用下进入水体,从而产生了地表水的污染^[1]。农业面源污染是我国长期存在的生态环境问题,水体中的氮、磷含量严重超标会导致水体中大量水生生物的异常繁殖,从而导致水质恶化,水体的生态平衡遭到严重破坏^[2]。农业生产中治理非点源污染最常采用方式就是建立河岸植被带。河岸植被带是指河水与陆地交界处两边,及直至河水影响消失为止的地带。河岸植被带包括显著影响水生生态系统物质和能量交换的陆地生态系统部分,是陆地生态系统向水生生态系统的过渡地带^[3],在改善生态系统质量的功能完整性、控制水体富营养化、沼泽化、确保饮水水源安全等方面有着十分重要的意义^[4]。河岸植被带可以通过植物的截留、吸附以及土壤的渗透作用来调节随径流进入河流生态系统的各种面源营养物质,从而达到控制河流中各种营养物质以及化学元素的含量;并且通过滞留、降低流速和沉降泥沙,从而有效减少或降解来自陆地的面源污染物对于河流的污染,起到净化水质的作用^[5]。然而世界上很多河岸植被带都遭到不同程度的破坏,使得河流水质下降,生态环境不断恶化^[6-7],对于河岸植被带的管理和保护已经成为焦点问题。

国外对河岸植被带的研究起步很早,从 20 世纪 80 年代初起,国外学者针对河岸带对河溪养分输入控制方面就开始了研究^[8]。在河岸植被带对溪流养分输入控制方面,已经取得诸多研究成果。河岸植被带对含氮、磷元素污染物的净化,主要通过一系列的物理、化学和生物过程进行。其中,物理过程发生于地表径流中的氮素和磷素,这些颗粒态的污染物通过沉积和渗透等方式实现在河岸植被带上的截留^[9];而另一部分可以渗透进土壤中并且溶解于壤中流的氮素和磷素,主要通过一系列的生物化学过程包括植物的吸收^[10]、微生物的反硝化作用^[11]以及土壤吸附等实现植被带对氮素的截留和转化。

较之国外相关研究进展,国内开展河岸植被带的研究起步较晚,重点聚焦在河岸带截留、转化面源污染物的效果研究。相关研究^[12-13]表明,栽植草本、灌

木和灌草的河岸植被带对阻控地表径流、降低径流中悬浮颗粒物浓度、质量和氮磷质量均有很好的效果。Zhang 等^[14]以辽河流域为例,通过对比河岸植被带流入和产出水样中 N、P 元素的含量,计算不同植物类型的元素转化效率。汤家喜等^[12]从植物类型及其植被带宽度、植物季节变化、土壤酶活性以及微生物群落变化等方面,探究草木犀带、草木犀与枫杨混合带(林草带)和杂草带(对照)对农业非点源污染中氮、磷的阻控效果。已有研究^[12-14]表明,河岸植被带对降雨径流中不同形态氮磷的消减效果存在一定的差异,尤其受土壤类型、植被配置等因素的影响而表现出不同的规律。目前,白洋淀上游河岸植被带面源污染净化能力的研究较少,亟须开展相关研究。

本文以大清河流域河岸植被带为研究对象,从河岸植被带截留、净化面源污染的生态功能角度探讨植被带植被的构建模式,评价不同植被配置模式氮、磷和泥沙净化能力,研究结果为该区域面源污染的阻控及生态修复技术设计提供参考,并为地方制定防治面源污染规划提供支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于白洋淀大清河流域,流域总面积 43 060 km²。大清河发源于太行山,西起太行山区东麓,东至渤海湾,南至子牙河,北临永定河,总体呈扇形分布。大清河水系总长度 483 km,流域内主要有南拒马河、潞龙河、白沟引河和瀑河等。地势自西北向东南倾斜,西部属太行山脉,东部属华北平原。研究区属于温带大陆性季风气候区,四季特征分明。冬季寒冷干旱少雪,夏季炎热多雨,春季多风少雨,秋季较为凉爽。年内降水分布极不均匀,大部分降雨量以暴雨的形式集中于 7—8 月,易产生旱涝等自然灾害。土壤类型主要为山地棕褐土、山地粗骨土和耕作褐土。常见的乡土植物主要有刺槐(*Robinia pseud-oacacia*)、连翘(*Forsythia suspensa*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)、二月兰(*Orychophragmus violaceus*)等。

1.2 试验方法

(1) 植物配置与种植。植物种类的选择遵循以本土植物为主,兼具生态适应性、经济实用性和物种多样性原则,同时还应满足河岸植被带净化污染物、

保持水土和改善立地的功能,最终选择 2 种草本和 1 种灌木,即黑麦草(*Lolium perenne*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)和胡枝子(*Lespedeza bicolor*),设置草本、灌木、混草、灌草等 5 种不同的植物配置模式,每种配置模式设置 3 次重复,试验采用裸土坡面作为试验对照,植物配置见表 1。

表 1 植物配置表		
试验编号	植物种及其配置	配置比例
1 (CB1)	狗牙根	
2 (CB2)	黑麦草	
3 (GM)	胡枝子	
4 (HC)	狗牙根×黑麦草	8 : 2
5 (GC)	胡枝子×狗牙根×黑麦草	1 : 8 : 1
6 (CK)	裸土	

试验采用南拒马河岸缓冲带自然土壤,使得模拟试验能够更加准确地展现实际栽种效果。通过对当地河岸植被带实际取样分析,在栽植的过程中,表土含水量稍高于底土含水量,经过压实后土壤容重与自然状况近似,土壤容重为 1.5 g/cm³。

植被种植时间为 2019 年 6 月初,草本和胡枝子的种子均按照植物组合比例混合后采用撒播的方式进行种植,不同植物配置模式的播种量及草本最终表现比例见表 2,植物最终平均株高为 8 cm;植物生长过程中不施肥,适时除草、浇水,待植物生理状态稳定开始放水冲刷模拟试验。本试验未考虑试验装置带来的边界效应。

(2) 放水冲刷试验布设。试验采用自制冲刷装置开展模拟放水冲刷试验,径流冲刷装置见图 1。冲刷装置由搅拌桶、搅拌器、冲刷装置、侵蚀槽 4 部分构成,侵蚀槽规格为 1.0 m×1.2 m,每个侵蚀槽包含 3 个单独小种植槽,单独小种植槽规格为 1.0 m×0.4 m,槽深 0.2 m。以实际河岸缓冲带的坡度为依据,设

置侵蚀槽坡度为 20°。

表 2 各植物种植密度及最终表现比例				
试验编号	播种密度/ (g·m ⁻²)	实际比例	各草本所占比例/%	
			狗牙根	黑麦草
1(CB1)	0.067		100	
2(CB2)	0.509			100
3(GM)	2.972			
4(HC)	0.054×0.102	17 : 3	85	15
5(GC)	0.297×0.054×0.051	5 : 14 : 1	30	70
6(CK)				

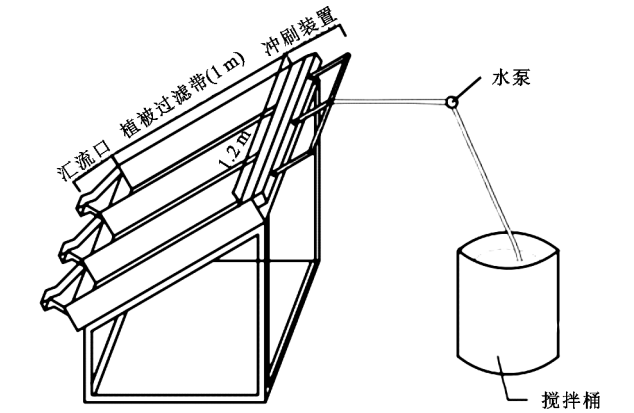


图 1 试验装置示意

为了模拟当地面源污染的特征,试验中设置不同浓度的氮、磷面源污染物(表 4),通过添加泥沙、尿素、磷酸二氢钾模拟 3 类、5 类、劣 5 类水质(表 4)。共计开展 6 组试验。于 2019 年 9—10 月开展模拟径流冲刷试验,试验开始前将水桶装满水,利用流量计将水、泥沙、尿素(CO(NH₂)₂)、磷酸二氢钾(KH₂PO₄)按照设置的比例在搅拌桶中搅匀备用。试验过程中,为形成均匀的薄层水流,控制试验径流流速为 0.1 L/min,径流深为 1 mm,待汇流口出流稳定 10 min 后连续采集 3 个样品,水样采回后-4℃保存并及时测定。每种配置模式设置 3 次重复,共计开展 6 组试验。

表 3 面源污染物进水浓度					单位:mg/L
试验处理	总氮	氨氮	硝氮	总磷	泥沙
低浓度	3.35±0.03	0.44±0.02	2.64±0.14	0.12±0.02	500±10.5
中浓度	4.48±0.08	0.53±0.04	3.24±0.17	0.18±0.02	700±14.6
高浓度	6.40±0.11	0.60±0.03	4.25±0.07	0.24±0.05	900±16.3

注:表中数据为平均值±标准差。

表 4 试验配比				
试验处理	泥沙/g	水/L	尿素/L	磷酸二氢钾/g
低浓度	50	100	0.431	0.176
中浓度	70	100	0.862	0.264
高浓度	90	100	1.293	0.352

(3) 样品测定。待收集的样品沉淀、过滤分离后,取 200 mL 上清液用于测定水样中的总氮、硝氮、氨氮、总磷。水样中总氮含量的测定采用过硫酸钾氧

化—紫外分光光度计法,总磷采用过硫酸钾氧化—钼蓝比色法^[15],氨氮采用纳氏试剂分光光度法^[16],硝氮采用紫外分光光度法^[17]。将过滤得到的泥沙样品,放置烘箱中烘干后测定不同试验组的泥沙含量。根据公式(1)计算各污染物的浓度消减率。

$$Rc = \frac{C_{进} - C_{出}}{C_{进}} \times 100\%$$

(1)

式中:*Rc* 为污染物质量浓度削减率(%);*C*_进 为入流污染物质量浓度(mg/L);*C*_出 为出流污染物质量浓度(mg/L)。

1.3 数据处理与分析

采用 Excel 2019 和 SPSS 18.0 软件对数据进行统计分析。利用 Origin 软件对处理好的数据进行图表的绘制。

2 结果与分析

2.1 不同植物配置模式对总氮和总磷的净化效率

大清河流域上游河岸缓冲带大面积种植农作物,入河径流中携带大量的氮磷污染物。植物具有较好的净化污染物功能,不同植被配置模式对总氮和总磷的净化效率见图 2。灌草配置模式和混草配置模式对于不同浓度的氮素和磷素净化效率较好;单一草本植物的净化效率次之;单一灌木最低。具体表现为灌草>混草>单一草本>单一灌木。

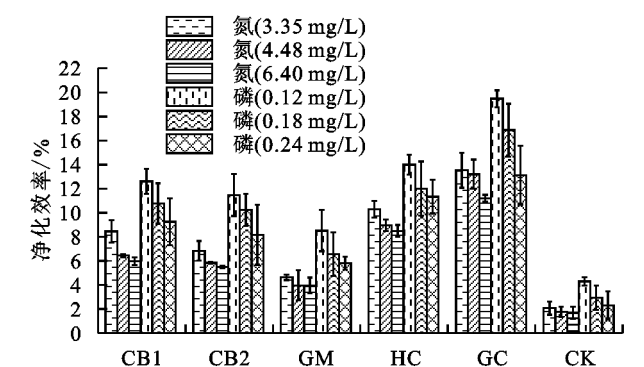


图 2 不同植物配置模式对不同浓度总氮和总磷的净化效率

在单一草本植物中,二者无显著性差异,其中狗牙根在各浓度条件下的净化效率均略高于黑麦草,结果表现为狗牙根的总氮和总磷净化效率分别为 6.96%和 10.88%,而黑麦草的净化效率分别为 6.06%和 9.96%。灌木植物胡枝子在各浓度总氮和总磷的净化效率上均比 2 种单一草本要低,呈显著性差异($p<0.05$),平均净化效率为总氮 4.16%,总磷 6.97%。混草和灌草模式中胡枝子×狗牙根×黑麦草总氮和总磷的净化效率最高,相对于其他配置模式呈显著性差异($p<0.05$),分别为氮低浓度 13.53%,氮中浓度 13.20%,氮高浓度 11.20%,磷低浓度 19.48%,磷中浓度 16.87%,磷高浓度 13.13%,其总氮、总磷的平均净化效率分别为 12.64%,16.49%,较裸土分别提升 10.84%,13.31%。

2.2 不同植物配置模式对氨氮和硝氮的净化效率

由图 3 可知,灌草配置模式和混草配置模式对于不同浓度的硝氮和氨氮的净化效率较好;单一草本植物的净化效率次之;单一灌木最低。具体表现为灌草>混草>单一草本>单一灌木。

在单一草本植物中,黑麦草和狗牙根间无显著性差异,其中黑麦草表现出较好的平均净化效果,氨氮和硝氮的平均净化率分别为 10.11%,9.54%,当污染

物浓度为硝氮中浓度时狗牙根的净化率高于黑麦草,分别为 10.13%,9.41%。灌木植物胡枝子的平均净化效率较低,氨氮、硝氮的净化效率分别为 6.00%,7.13%,相对于其他植被配置模式呈显著性差异($p<0.05$)。灌草和混草植物配置模式对于各浓度下的氨氮和硝氮的净化效果间均无显著性差异,而相对于单一草本和单一灌木存在着显著性差异($p<0.05$),狗牙根×黑麦草的混草配置模式具有较好的高浓度氨氮净化效率(11.10%)。除氨氮高浓度外,灌草配置模式胡枝子×狗牙根×黑麦草的净化效率较高,分别为低浓度氨氮 12.75%,中浓度氨氮 12.08%,低浓度硝氮 16.96%,中浓度硝氮 15.70%,高浓度硝氮 11.27%,且表现出最佳的氨氮和硝氮净化效果,平均净化率分别为氨氮 11.93%,硝氮 14.64%,较裸土分别提升 9.64%,12.36%。

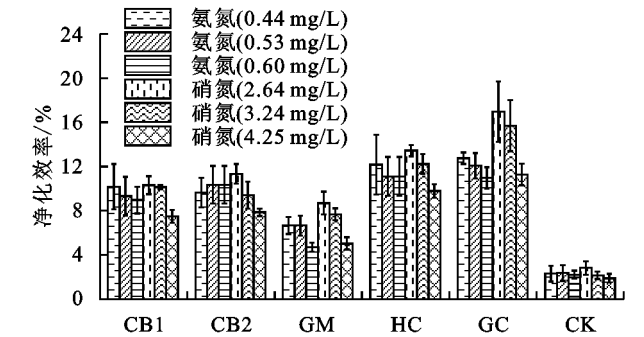


图 3 不同植物配置模式对不同浓度氨氮和硝氮的净化效率

河岸植被带对于总氮、总磷、氨氮和硝氮的去除效率均表现为低浓度>中浓度>高浓度,这一定程度表明植物带对于氮磷面源污染物的去除是有一定的限度的,在面源污染物浓度较高的时候,河岸植被带对于面源污染物的总体净化效率降低。

2.3 不同植被配置模式对泥沙的截留效率

植被具有拦截泥沙的功能,由于植物的阻挡作用,使得对径流前进的阻力增大,水流速度降低,进而导致泥沙颗粒产生淀积,从而达到清水产流的效果。由图 4 可知,单一草本植物、灌草配置模式和混草配置模式对于不同含沙量径流的泥沙截留效率均较好;单一灌木配置模式最低,具体表现为灌草≈混草>单一草本>单一灌木。

灌草和混草植物配置模式对于各浓度下的泥沙的截留效果间均无显著性差异,而相对于单一草本和单一灌木存在着显著性差异($p<0.05$),当径流挟沙量为低浓度和高浓度时,灌草配置模式胡枝子×狗牙根×黑麦草表现出最高的截留效率,分别为 58.50%和 36.33%;当径流挟沙量为中浓度时,狗牙根×黑麦草的混草配置模式的截留效率最好,数值为 52.67%,灌草配置模式的净化效率略高于混草,平均截留效率为

49.05%，较裸土提升了 46.43%。在单一草本植物中，黑麦草和狗牙根间无显著性差异，狗牙根的平均截留效率高于黑麦草，分别为 34.20%和 27.89%。单一灌木胡枝子的平均泥沙截留效率较低，仅为 9.94%。

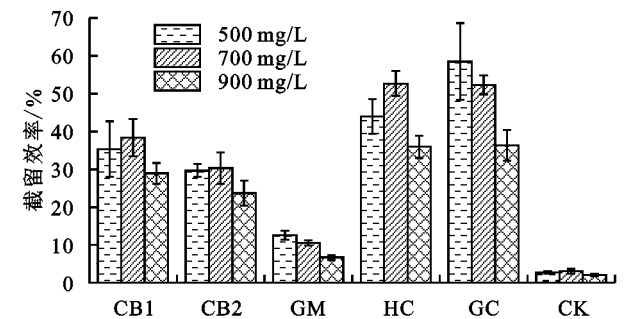


图 4 不同植物配置模式对泥沙的截留效率

此外，对比分析径流挟带低中高浓度泥沙的试验结果可知，河岸植被带对于泥沙的去除效率表现为低浓度>中浓度>高浓度，表明植物带对于泥沙的去除效果在一定浓度范围内表现出较好的效果，当泥沙浓度过高时，植物的截留效率降低。

3 讨论

河岸植被带可以通过一系列物理、化学、生物及生物化学过程实现对氮磷面源污染物的净化作用，包括物理沉降、植物根系吸收、反硝化作用等。本研究选取 3 种草本和 3 种灌木，构建多种植物配置模式，通过模拟径流冲刷试验，分析对比不同植物配置模式对不同面源污染物及泥沙的净化截留效率。从结果中可以看出，复合植被配置比单一植被配置对于面源污染物及泥沙的净化截留效率要高，这是由于将多种植物组合在一起，共同生长一段时间后，其中存在的互利共生关系达到稳定^[18]，形成群落后，共同发挥各种生态效益，待系统稳定后，生物多样性、生物量、抗逆性、景观观赏性等方面均可超过单一植物的种群，这与孙东耀等^[13]在九龙江上游北溪龙岩段的研究和杨波等^[2]在辽河的研究中所得出的结论相一致；此外，本次试验中不同植被配置模式对面源污染物及泥沙的净化截留效率大小一般表现为灌草配置模式>混草配置模式>单一草本配置模式>单一灌木配置模式，这与李凯等^[19]在研究密云水库库滨带对面源污染物影响中所得出的结论相似。灌草配置模式的截留效率较高，主要是由于灌草相较于单一的植被具有较高物种多样性和植物盖度，植被现存量较为稳定，是河岸带首选的植被类型，这与李萍萍等^[20]在太湖流域东备河自然河道的研究总所得出的结论一致。因此，构建研究区合理的河岸植物植被带，在选取植物种类的时候，推荐选用草本植物和灌木组合来得到较好的净化和截留效果。

河岸植被带对地表水的净化作用在很大程度上取决于植被带的植被类型^[21]。单一草本对泥沙和氮磷面源污染物的截留和净化效率均高于单一灌木，从泥沙的角度来看，这是因为草本对于浅层土壤有着固化作用，与李林英等^[22]的研究结果一致；而从氮磷面源污染物的角度来看，这是因为草本植被通常在相同的生长期内具有很高的覆盖度和生物量，可以更多地吸收流经水体中的营养盐，同时地下根系分布更深，密度更大，与流经水体的接触面更大，能有效减缓地表径流的流速，使得土壤和根系附生微生物充分地发挥降解、转化作用，去除氮、磷等营养物以及有毒有害物质，生长浓密的草本植物可以对径流起到更佳的阻截效果，从而增大氮磷面源污染物沉降的量，提高净化效率，这与胡威等^[23]的研究结果相一致。植被覆盖与否是决定河岸植被带颗粒物净化功能的关键^[24]，草本植物相对灌木来说有着更高的地表植被覆盖率，在截留地表水中悬浮颗粒物、泥沙、沉积物等颗粒物有着更出色的能力，这与吴尧^[24]对学术数据库中所收集的资料的研究中得出的结论一致。

在单一草本中，狗牙根对氮磷面源污染物和泥沙的净化效率最佳，这是由于狗牙根具有发达的根状茎或匍匐茎，每个茎节都长出不定根，增加对径流的阻挡效率，有效降低地表流速，增加地表径流中的颗粒态氮磷和泥沙的沉降量，从而达到对氮磷面源污染物和泥沙更佳的净化效率，与段诚^[25]的研究结果一致；狗牙根生长繁茂，对地表径流和土壤中的氮和磷周转速率快于其他植被类型，这与杨文航等^[26]在丹江口研究狗牙根对于营养元素中氮和磷周转速率的研究结论相似。在单一灌木配置模式中，胡枝子属于半灌木或灌木，具有很强的适应性，对改善土壤理化性质和营养状况效率明显，加强了土壤对于面源污染物的吸附作用，是适合其他植物种生长的理想先锋物种，与孙清斌等^[27]的研究结果一致。

不同污染物之间比较，不同河岸带植被对总磷的净化效率普遍最高。与氮相比，磷元素移动性差，相当数量的磷被吸附在固体颗粒物上，在地表径流流经河岸植被带时被截留沉降，这与赵警卫等^[28]在徐州市铜山区三堡镇奎河东侧的河岸带得研究中所得出的结论一致。

4 结论

(1)草本植物的净化效果优于灌木植物，具体表现为狗牙根对总磷、总氮和泥沙的净化效率最佳，分别为 10.88%，6.96%，34.2%，黑麦草对氨氮和硝氮的净化效率最佳，分别为 10.11%和 9.54%。

(2)灌草和混草的植物配置模式能有效减少面源污染,其中以胡枝子×狗牙根×黑麦草的配置模式的净化效果最佳,对总磷、总氮、氨氮、硝氮和泥沙的净化效率分别较裸土提高了 13.31%,10.84%,9.64%,12.36%,46.43%。

(3)灌草和混草的植物配置模式较单一的植被有更好的净化效果。

参考文献:

[1] 刘瑞霞,王立阳,孙菲,等.以农业面源污染阻控为目标的河流生态缓冲带研究进展[J].环境工程学报,2022,16(1):25-39.

[2] 杨波,汤洁,李海毅,等.6 种北方乔木植物净化污水效果研究[J].北方园艺,2014(22):62-65.

[3] 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.

[4] Magette W L, Brinsfield R B, Palmer R E, et al. Nutrient and sediment removal by vegetated filter strips[J]. Transactions of the ASAE,1989,32(2):663-667.

[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] David L C, Thomas E J, Weller D E. Nutrient flux in a landscape: Effects of coastal land use and terrestrial community mosaic on nutrient transport to coastal waters[J].Estuaries,1992,15(4):431-442.

[7] Lowrance R, Altier L S, Newbold J D, et al. Water quality functions of riparian forest buffers in chesapeake bay watersheds[J].Environ Manage,1997,21(5):687-712.

[8] Gharabaghi B, Rudra R, Whiteley H R, et al. Development of a management tool for vegetative filter strips [J]. Journal of Water Management Modeling,2002,83(7):e14796.

[9] Nash D M, Hannah D, Halliwell, et al. Factors affecting phosphorous export from apastrure-based grazing system[J].Journal of Environmental Quality,2000,140(3):59-68.

[10] Wenger S. A review of the scientific literature on riparian buffer width extent and vegetation [M]. Revised Version Georgia: University of Georgia Press,1999.

[11] Pinay G, Roques L, Fabre A. Spatial and temporal patterns of denitrification in a riparian forest[J].Journal of Applied Ecology,1993,30(4):581-591.

[12] 汤家喜,孙丽娜,孙铁珩,等.河岸缓冲带对氮磷的截留

转化及其生态恢复研究进展[J].生态环境学报,2012,21(8):1514-1520.

[13] 孙东耀,全川,纪钦阳,等.不同类型植被河岸缓冲带对模拟径流及总磷的消减研究[J].环境科学学报,2018,38(6):2393-2399.

[14] Zhang H L, Gao X, Sun L N. Ecological modification to riparian buffer strips of Liaohe River, Northeast China [J]. Advanced Materials Research, 2014, 955/959:1973-1976.

[15] 李芸,王斌,袁静,等.基于 VFSMOD 模型的植被缓冲带对千岛湖地区农田面源污染磷负荷削减效果模拟[J].环境工程技术学报,2022,12(1):29-37.

[16] 王成龙.基于纳氏试剂分光光度法的水质氨氮检测与数据分析[D].武汉:华中科技大学,2011.

[17] 汤典峰,刘成富.过硫酸钾氧化—酚二磺酸分光光度法对总氮的测定[J].山东化工,2019,48(11):53-56.

[18] 曹梓豪,赵清贺,左宪禹,等.基于坡面水文连通性的黄河下游河岸缓冲带植被格局优化[J].应用生态学报,2018,29(3):739-747.

[19] 李凯,程金花,陈仲旭.密云水库库滨带不同植被配置模式下面源污染特征分析[J].生态环境学报,2019,28(6):1183-1192.

[20] 李萍萍,崔波,付为国,等.河岸带不同植被类型及宽度对污染物去除效果的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2013,37(6):47-52.

[21] 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.

[22] 李林英,苏天杨,姚延椿.不同植被带植物在河岸缓冲带中所起的不同作用研究[J].天津农业科学,2010,16(6):69-72.

[23] 胡威,王毅力,储昭升.草皮植被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):46-52.

[24] 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,2021,44(13):49-51.

[25] 段诚.典型库岸植被缓冲带对陆源污染物阻控能力研究[D].武汉:华中农业大学,2014.

[26] 杨文航,任庆水,秦红,等.三峡库区消落带不同海拔狗牙根草地土壤微生物生物量碳氮磷含量特征[J].草业学报,2018,27(2):57-68.

[27] 孙清斌,尹春芹,邓金锋,等.施用外源物对尾矿土壤种植胡枝子修复效应初探[J].土壤,2019,51(5):986-994.

[28] 赵警卫,胡彬.河岸带植被对非点源氮、磷以及悬浮颗粒物的截留效应[J].水土保持通报,2012,32(4):51-55.