

土壤-植物系统对径流污染物截留的影响因子分析

霍炜洁^{1,2}, 周怀东^{1,2*}, 刘玲花^{1,2}, 赵高峰¹

(1.中国水利水电科学研究院水环境研究所, 北京 100038; 2.中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要:通过比较3种土壤-植物系统,分析确定了植被条件、污染物浓度、进水流量和坡度对地表径流污染物去除率的影响。研究表明:植被条件、进水浓度、进水流量和坡度对污染物去除率的影响因污染物的存在状态和性质不同而变化;颗粒态污染物SS、PP和COD_{Mn}的截留特征受4种因素的影响显著,“土壤-紫花苜蓿”和“土壤-高羊茅”系统的污染物去除率显著优于对照系统,并随进水浓度、进水流量和坡度增加而降低;溶解态污染物NO₃-N、NH₄-N和TDP的净化效果受植被条件和进水浓度的影响显著,“土壤-高羊茅”系统的污染物去除率显著优于“土壤-紫花苜蓿”和对照系统,NO₃-N去除率在中等浓度时最高,NH₄-N和TDP去除率随浓度增加而显著增加,NO₃-N去除率受进水流量影响显著,随进水流量增加而降低,NH₄-N去除率受坡度影响显著,随坡度的增加而降低。研究得出在构建土壤-植物系统的实践中,应根据上游污染源区污染状况及接纳水体水质要求设计净化系统,并选种地表密集生长的植被及适当降低系统坡度来提高土壤-植物系统的环境功能。

关键词:土壤-植物系统;径流污染物;污染物去除率

中图分类号:X522 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)04-0798-07 doi:10.11654/jaes.2013.04.021

Factors Affecting Runoff Pollutants Trapping in Soil-Plant System

HUO Wei-jie^{1,2}, ZHOU Huai-dong^{1,2*}, LIU Ling-hua^{1,2}, ZHAO Gao-feng¹

(1.Department of Water Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2.State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The effects of vegetation type, pollutant concentration, flow velocity and slope on runoff pollutant removal efficiency were studied by comparing three kinds of soil-plant systems, namely “soil-alfalfa” system, “soil-tall fescue” system and control system with no vegetation. Results indicated that the influence of vegetation type, pollutant concentration, flow velocity and slope on pollutant removal efficiency varies with the status and nature of pollutants. The trapping of particulate pollutant SS(suspended solid), PP(particulate phosphorus) and COD_{Mn} is affected by the above mentioned four parameters obviously. The particulate pollutant removal efficiencies in the “soil-alfalfa” system and “soil-tall fescue” system were significantly superior to the control system, and decreased with the increasing of influent concentration, influent flow rate and slope. The removal efficiencies of dissolved pollutant NO₃-N, NH₄-N and TDP(total dissolved phosphorus) were affected by vegetation type and influent concentration significantly. The dissolved contaminant removal efficiency in the “soil-tall fescue” system was better than the “soil-alfalfa” system as well as the control system. Nitrate removal rate reached highest in moderate concentration. The removal efficiencies of NH₄-N and TDP increased with the increase of their concentrations. Nitrate removal rate decreased remarkably with increasing influent flow rate. The removal rate of NH₄-N decreased significantly with increasing slope of soil system. It was concluded through the investigation that while constructing soil-plant system to control runoff pollutants, the upstream pollution status and the receiving water quality requirement should be considered, a dense growth of surface vegetation should be selected, and the slope of the soil system should be lowered to improve contaminant trapping function of soil-plant system.

Keywords: soil-plant system; runoff pollutants; contaminant removal efficiency

收稿日期:2012-10-08

基金项目:中国水利水电科学研究院青年基金项目(环集1339);十二五科技支撑计划村镇受损生态系统修复与重建实用技术研发项目(2012BAJ21B03);国家自然科学基金创新研究群体基金项目“流域水循环模拟与调控”(51021006)联合资助

作者简介:霍炜洁(1980—),女,河北邯郸人,博士研究生,主要从事地表水污染生态修复研究。E-mail:huoweijie2005@126.com

*通信作者:周怀东 E-mail:hdzhou@iwhr.com

地表径流是污染物输移的主要路径,在污染源和受纳水体间设置植被区域,利用土壤-植物系统阻滞地表径流及拦蓄污染物,已在美欧等国得到广泛的研究和应用,并被证明是一种低成本、高成效的径流治理措施^[1]。然而土壤-植物系统的净化效果因不同地区的气候、地形地貌、土壤条件、植被类型和径流污染物特征不同而存在极大的空间差异,明确净化效果与影响要素之间的关系是其设计和优化应用的基础。我国目前仅有少量的相关实验,且集中于上海和西北地区^[2-5],缺乏在其他地区条件下的实验报道,尤其是综合比较多种要素对截留不同性质污染物的影响研究尚未见报道。

本研究采用华北地区沙壤土及本地常见植物紫花苜蓿和高羊茅构建 3 种土壤-植物系统,统一污染物种类、土壤条件和净化系统长度,选择植被条件、污染物进水浓度、进水流量和坡度为主要影响因子,采用正交方法分析 4 种影响因素对污染物去除率的影响,旨在为设计和应用土壤-植物多介质系统提供依据。

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验装置由 PE 配水桶和土槽系统组成,PE 配水桶容积 800 L,以流量计控制出水流量,土槽系统由引流槽和土槽组成,引流槽容积为 0.3 m×0.5 m×0.5 m,污水进入引流槽后经水平溢流进入土槽,土槽容积为 6.0 m×0.5 m×0.5 m,沿槽体 2、4 m 和 6 m 处开有表孔(1、3、5 号)和底孔(2、4、6 号)。土槽置于托架之上,坡度可调,结构如图 1 所示。土槽内填土深约 0.35 m,供试土壤主要理化指标列于表 1,根据土壤机械组成数据,按照国际制土壤质地分类标准^[6],判断该土壤为壤质沙土。

1.2 实验因素水平的确定

1.2.1 植被条件

构建 3 种植被条件的实验土槽,分别为对照系统、土壤-紫花苜蓿系统和土壤-高羊茅系统,对照系

表 1 供试土壤的主要理化性质

Table 1 Main physical and chemical properties of the tested soil

有机质含量/ g·kg ⁻¹	全氮含量/ g·kg ⁻¹	全磷含量/ g·kg ⁻¹	pH 值	颗粒组成/%		
				沙粒	粉粒	黏粒
5.64	0.191	0.243	7.60	70.96	26.00	3.04

统为未种植植被的土槽。土壤-紫花苜蓿系统植被以紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)为主,植被盖度约为 85%,实验前测定其平均根长 40 cm,平均高 32 cm,鲜重 3.26 kg·m⁻²,干重 1.02 kg·m⁻²;土壤-高羊茅系统植被以高羊茅(*Festuca arundinacea*)为主,植被盖度约为 85%,实验前测定其平均根长 29 cm,平均高 32 cm,鲜重 2.89 kg·m⁻²,干重 0.86 kg·m⁻²。高羊茅和紫花苜蓿均于 2010 年 3 月栽种,过水实验于 2011 年 7 月至 10 月进行。

1.2.2 坡度

坡度是表征土壤-植物多介质系统陡缓程度的参数,坡度越小,坡面径流速度越低,污染物的停留时间越长。本实验参考相关文献^[3-5,7-16],设定 3%、6% 及 10% 3 种坡度水平。

1.2.3 流量

流量是重要的水力要素之一,其大小直接影响土壤-植物系统内的径流速度,进而影响水流携带污染物的能力。根据进水设施条件,本实验设定了 3 种流量水平,分别为低等流量 3.89×10⁻⁵~4.45×10⁻⁵ m³·s⁻¹、中等流量 7.42×10⁻⁵~9.70×10⁻⁵ m³·s⁻¹ 和高等流量 1.15×10⁻⁴~1.32×10⁻⁴ m³·s⁻¹。

1.2.4 进水浓度

径流中污染物浓度受到上游污染源区水土保持情况、降雨量及降雨强度的影响,土壤-植物多介质系统是具有一定面积的自然处理场,对截留物质的转化效率较低,考察进水浓度对污染物截留效率的影响是评价土壤-植物系统环境效益的重要方面。本实验设定 6 项污染指标的 3 种浓度水平,具体数据列于表 2。

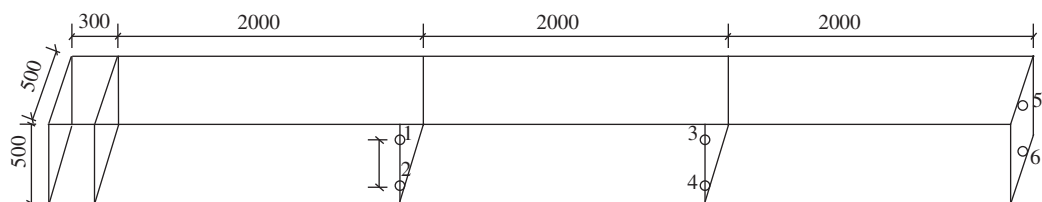


图 1 土槽结构示意图(mm)

Figure 1 Schematic diagram of soil bin(mm)

表 2 土壤-植物系统正交实验 L⁹(3⁴)因素与水平表
Table 2 Orthogonal test with four parameters and three levels in soil-plant systems

因素	植被条件	污染物进水浓度/mg·L ⁻¹						进水流量/m ³ ·s ⁻¹	坡度/%
		SS	PP	NO ₃ -N	NH ₄ ⁺ -N	TDP	COD _{mn}		
水平 1	对照	374~495	0.687~0.856	3.16~6.32	0.41~0.49	0.32~0.52	17.09~18.97	3.89×10 ⁻⁵ ~4.45×10 ⁻⁵	3
水平 2	紫花苜蓿	569~695	1.112~1.538	7.12~8.16	0.8~1.05	0.85~1.02	23.30~24.85	7.42×10 ⁻⁵ ~9.70×10 ⁻⁵	6
水平 3	高羊茅	851~1068	1.743~2.187	8.46~10.32	1.70~3.04	1.68~1.89	27.22~31.07	1.15×10 ⁻⁴ ~1.32×10 ⁻⁴	10

1.3 水样采集及分析方法

本实验在 3 个模拟土槽上分别构建对照系统、土壤-紫花苜蓿系统和土壤-高羊茅系统。土槽放置于北京玉渊潭公园南侧昆玉河旁实验区内,采用模拟径流方式进水:配水桶中根据进水浓度设计精确添加 NH₄HCO₃、过磷酸钙和泥土颗粒,模拟农田地表径流中 SS、N 素和 P 素污染物质。在 3 个模拟槽上按照正交设计的 9 种处理设置坡度、浓度和进水流量,每个处理重复 2 次,一共 18 次实验。每次实验采集土槽进水和 6 m 出水各 4 个平行水样,水样采集后即刻进行分析。悬浮物(SS)浓度采用重量法测定;COD_{mn}采用高锰酸钾氧化法测定;总氮(TN)浓度采用过硫酸钾-紫外分光光度法测定;总磷(TP)浓度采用过硫酸钾氧化-钼锑抗比色法测定。水样经 0.45 μm 滤膜过滤后测定溶解性指标:硝酸盐氮(NO₃-N)浓度采用紫外分光光度法测定;氨氮(NH₄⁺-N)浓度采用纳氏法测定;溶解磷(TDP)浓度测定方法与总磷(TP)相同;颗粒磷(PP)浓度为总磷(TP)与溶解磷(TDP)的浓度差值。具体实验步骤参照《水和废水监测分析方法》(第四版)^[17]。

1.4 评价指标及数据分析

以污染物去除率作为净化效果的评价指标,数据经 Microsoft Excel 程序整理,正交实验方差分析通过 SPSS 17.0 软件完成。

2 结果与分析

2.1 地表径流颗粒态污染物及 COD_{mn} 去除率的正交分析

土壤-植物系统污染物去除率的正交实验(4 因素 3 水平)结果见表 3,对实验结果进行统计,方差分析结果见表 4,极差分析结果见表 5。由方差分析可知,4 种因素均是影响 SS 去除率的极显著因素,计算植被条件、进水浓度、进水流量和坡度的极差 *R* 值分别为 76.30、58.13、55.22 和 30.78,各因素显著度由大到小依次为植被条件、进水浓度、流量和坡度。比较各因素不同水平下的平均污染物去除率 (*k_i*, *i*=1,2,3),

可知 SS 去除率的优水平组合为土壤-高羊茅系统(或土壤-紫花苜蓿系统)、低进水浓度、低进水流量和 3%坡度。

PP 为颗粒态磷,主要吸附于悬浮颗粒物上,随悬浮物的沉积而截留在净化系统中^[7],由方差分析结果知 4 种因素均为 PP 去除率的极显著影响因素,计算植被条件、进水浓度、进水流量和坡度的极差 *R* 值分别为 63.76、69.32、57.29 和 52.84,得出各因素的显著度由大到小排序为进水浓度、植被条件、流量和坡度。比较各因素对应的 *k_i*,可知紫花苜蓿和高羊茅下的 PP 去除率均明显优于空白对照,其他影响因素的优水平分别为低进水浓度、低进水流量和 6%坡度。

COD_{mn} 是表征地表径流中有机质含量的参数,方差分析得出 4 种因素均为 COD_{mn} 去除率的极显著影响因素。计算植被条件、进水浓度、进水流量和坡度的极差 *R* 值分别为 23.58、26.08、17.92、22.37,按显著度由大到小排序为进水浓度、植被条件、坡度和流量。比较 *k_i* 可知各因素优水平为土壤-高羊茅系统(或土壤-紫花苜蓿系统)、低进水浓度、低进水流量和 3%坡度。

颗粒态污染物 SS 和 PP 的截留特征具有相似性,植被条件、进水浓度、流量和坡度均为影响去除率的极显著因素。比较各因素不同水平下的平均污染物去除率(*k_i*),可得出各因素的影响规律和趋势:土壤-高羊茅系统和土壤-紫花苜蓿系统的 SS 和 PP 去除率均显著优于对照系统,植被优势明显;SS 和 PP 去除率均呈现出随进水浓度、进水流量和系统坡度的增加而减小的趋势。由于径流中的有机质主要是通过侵蚀土壤产生的,本实验中 COD_{mn} 去除率也表现出和颗粒态污染物相似的特征。

2.2 地表径流溶解态污染物去除率的正交分析

由方差分析结果可知,植被、浓度为 NO₃-N 去除率的极显著影响因素,流量为显著性因素,坡度为不显著因素,计算植被条件、进水浓度、进水流量和坡度的极差 *R* 值分别为 21.89、8.97、7.11、4.07,显著度由大到小排序为植被条件、进水浓度、进水流量和坡度。

表 3 正交试验结果
Table 3 Results of orthogonal test

实验号	植被条件	进水浓度	进水流量	坡度	污染物去除率/%					
					SS	PP	COD _{Mn}	NO ₃ -N	NH ₄ ⁺ -N	TDP
1	CK	L	L	3%	61.57	71.96	69.48	-5.12	-19.05	7.78
2	CK	M	M	6%	21.63	75.49	38.51	-2.70	7.78	9.52
3	CK	H	H	10%	-82.56	-89.41	3.11	-0.97	4.24	15.30
4	S-A	L	M	10%	90.56	91.50	52.30	-0.27	20.41	21.50
5	S-A	M	H	3%	58.45	73.34	46.98	7.65	25.79	16.96
6	S-A	H	L	6%	74.79	84.48	53.73	7.49	34.54	37.36
7	S-F	L	H	6%	79.62	94.37	71.50	13.25	47.50	42.63
8	S-F	M	L	10%	84.80	93.72	52.14	29.81	46.25	42.94
9	S-F	H	M	3%	65.13	54.80	58.21	13.83	43.15	47.93

注:植被条件中 CK 为对照系统,S-A 为土壤-紫花苜蓿系统,S-F 为土壤-高羊茅系统;进水浓度中 L 为低浓度,M 为中浓度,H 为高浓度;进水流量中 L 为低流量,M 为中流量,H 为高流量;污染物去除率为 2 次实验计算的平均去除率。

表 4 正交实验方差分析
Table 4 Variance analysis of orthogonal test results

分析指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	显著性
SS 去除率	植被	45 441.496	2	22 720.748	366.323	**
	浓度	20 640.082	2	10 320.041	166.389	**
	流量	19 642.845	2	9 821.423	158.349	**
	坡度	6 906.789	2	3 453.395	55.679	**
PP 去除率	植被	31 465.022	2	15 732.511	19.794	**
	浓度	35 827.097	2	17 913.548	22.539	**
	流量	22 636.772	2	11 318.386	14.241	**
	坡度	17 309.694	2	8 654.847	10.889	**
COD _{Mn} 去除率	植被	3 375.349	2	1 687.674	97.764	**
	浓度	4 323.243	2	2 126.621	125.219	**
	流量	1 927.569	2	963.784	55.830	**
	坡度	3 457.628	2	1 728.714	100.142	**
NO ₃ -N 去除率	植被	2 950.288	2	1 475.144	51.031	**
	浓度	483.451	2	241.726	8.362	**
	流量	305.120	2	152.560	5.278	*
	坡度	116.868	2	58.434	2.021	-
NH ₄ ⁺ -N 去除率	植被	13 933.688	2	6 966.844	188.998	**
	浓度	1 161.286	2	580.643	15.752	**
	流量	171.211	2	85.606	2.322	-
	坡度	1 070.583	2	535.291	14.521	**
TDP 去除率	植被	6 826.466	2	3 413.233	46.977	**
	浓度	798.549	2	399.275	5.495	*
	流量	122.894	2	61.447	0.846	-
	坡度	189.457	2	94.728	1.304	-

注:** 表示极显著;* 表示显著;-表示不显著。

比较各因素对应的 k_i , 得出各因素优水平分别为土壤-高羊茅系统、中等进水浓度、低等进水流量和 3% 坡度。由于坡度为不显著因素,其水平变化对 NO₃-N

的去除率影响较小,但考虑到降低坡度有利于其他污染物截留,故坡度优水平确定为 3%。

方差分析得出植被、浓度和坡度为 NH₄⁺-N 去除

表 5 正交实验结果的极差分析
Table 5 Range analysis of orthogonal test results

分析指标		A	B	C	D
SS 去除率	k_1	0.21	77.25	73.72	61.72
	k_2	74.60	54.96	59.11	58.68
	k_3	76.52	19.12	18.50	30.93
	极差 R_{ij}	76.30	58.13	55.22	30.78
	因素主次	A;B;C;D 优水平 A2(A3) B1 C1 D1			
PP 去除率	k_1	19.35	85.94	83.39	66.70
	k_2	83.11	80.85	73.93	84.78
	k_3	80.96	16.62	26.10	31.94
	极差 R_{ij}	63.76	69.32	57.29	52.84
	因素主次	B、A;C、D 优水平 B1 A2(A3) C1 D2			
COD _{mn} 去除率	k_1	37.03	64.43	58.45	58.22
	k_2	51.00	45.88	49.67	54.58
	k_3	60.62	38.35	40.53	35.85
	极差 R_{ij}	23.58	26.08	17.92	22.37
	因素主次	B、A、D;C 优水平 B1 A2(A3) D1 C1			
NO ₃ -N 去除率	k_1	-2.93	2.62	10.73	5.45
	k_2	4.96	11.59	3.62	6.01
	k_3	18.96	6.78	6.64	9.52
	极差 R_{ij}	21.89	8.97	7.11	4.07
	因素主次	A;B;C;D 优水平 A3 B2 C1 D1			
NH ₄ -N 去除率	k_1	-2.34	16.29	20.58	16.63
	k_2	26.91	26.61	23.78	29.94
	k_3	45.63	27.31	25.84	23.63
	极差 R_{ij}	47.98	11.02	5.26	13.31
	因素主次	A;D;B;C 优水平 A3 D2 B3 C3			
TDP 去除率	k_1	10.87	23.97	29.36	24.22
	k_2	25.27	23.14	26.32	29.84
	k_3	44.50	33.53	24.96	26.58
	极差 R_{ij}	33.63	10.39	4.40	5.61
	因素主次	A;B;D;C 优水平 A3 B3 D1 C1			

注:A 为植被条件,B 为进水浓度,C 为流量,D 为坡度; k_i ($i=1,2,3$)为因素每个水平的平均去除率,其中 k_1 表示该因素的 1 水平所对应去除率之和的平均值,同理 k_2 和 k_3 表示该因素的 2、3 水平所对应去除率之和的平均值, k_i 最大者即为该因素的优水平;极差 R 为同一因素的 k_1 、 k_2 、 k_3 中最大值与最小值之差,直观而言,因素的极差 R 越大,该因素对污染物去除率的影响也就越显著^[18]。

率的极显著影响因素,流量为不显著因素($P=0.120$)。计算植被条件、进水浓度、进水流量和坡度的极差 R 值分别为 47.98、11.02、5.26、13.31,按显著度由大到小排序为植被条件、坡度、进水浓度和流量。比较各因素对应的 k_i ,得出各因素优水平分别为土壤-高羊茅系统、6%坡度、高进水浓度和低流量。

方差分析得出植被为 TDP 去除率的极显著影响因素,浓度为显著性影响因素,流量和坡度均为不显

著因素。计算植被条件、进水浓度、流量和坡度的极差 R 值分别为 33.63、10.39、4.40 和 5.61,按显著度由大到小排序为植被条件、进水浓度、坡度和流量。比较各因素对应的 k_i ,得出各因素优水平分别为土壤-高羊茅系统、高进水浓度、低流量和 3%坡度,TDP 坡度和流量优水平的选择原因与 NO₃-N 相同,均根据有利于同时截留其他污染物的目的来考虑。

植被条件是影响溶解态污染物 NO₃-N、NH₄⁺-N 和 TDP 截留效果的显著性因素,与颗粒态污染物不同的是,土壤-高羊茅系统内的 NO₃-N、NH₄⁺-N 和 TDP 去除率显著优于土壤-紫花苜蓿系统,前期的单因素实验结果也支持了同样结论,分析认为紫花苜蓿为直根型牧草,株形半直立,单株分枝多,而高羊茅为须根型禾本科植物,生长呈丛生状,虽然两种植被的盖度相当,但后者近地表的生长密集程度高于前者,从而有助于污染物的吸附、过滤和植物吸收。植物生长密集有助于拦蓄污染物,但植物对 N、P 的吸收和转化能力还受到植株的生长状态、生长期和根系发育的微生物群落^[9]等因素的影响,故高羊茅对营养盐的吸收力是否优于紫花苜蓿还需要进一步的验证。

本研究中进水浓度为 3 种溶解态污染物去除率的显著性影响因素,但极差分析得出其影响趋势因污染物不同而存在差异:NO₃-N 去除率为中等进水浓度时最高,NH₄⁺-N 和 TDP 去除率均呈现随进水浓度增加而增加的趋势。去除率的变化趋势说明本净化系统尚能承受 NH₄⁺-N 和 TDP 的污染负荷增加量,而 NO₃-N 当由中等进水浓度 7.12~8.16 mg·L⁻¹ 升至高等进水浓度 8.46~10.32 mg·L⁻¹ 后,其截留效果开始受到影响。进水流量和坡度对溶解态污染物去除率的影响也因污染物的性质不同而存在差异,NO₃-N 的溶解性强而吸附性较弱,主要通过土壤入渗和植物吸收截留,其去除率随进水流量的增加而减少,3%~10%的坡度变化未对 NO₃-N 去除率产生显著影响;NH₄⁺-N 和 TDP 易于在土壤表面产生吸附作用,实验得出 NH₄⁺-N 去除率呈现随坡度的增加而减少的趋势,而流量为不显著因素,TDP 去除率均未受到流量和坡度的显著影响。

3 讨论

植被条件、进水浓度、流量和坡度对污染物去除率的影响因污染物的性质不同而不同。对于颗粒态污染物和溶解态污染物而言,植被条件均是影响截留效果的首要因素。泥沙等颗粒态污染物主要通过沉积作用截留在净化系统中,本研究中覆盖度为 85%的两种

植被均能有效滞缓径流、促进沉积,但对于溶解态污染物而言,地表生长更为密集的高羊茅被认为更有利于污染物的过滤、吸附和生物吸收。在构建土壤-植物系统时,应结合本地植物种类,选择生长密集度高、具有发达根系的植被类型,如茎叶呈丛生状的禾本科高羊茅(*Festuca arundinacea*)^[1,12,16]、狗牙根草(*Cynodon*)^[12]、香根草(*Vetiveria zizanioides* L.)^[3]、鸭茅草(*Dactylis*)^[14,16]、马唐草(*Digitaria*)^[15-16]、草地早熟禾(*Poa pratensis*)^[16]及黑麦草(*Lolium*)^[16]等。

进水浓度对污染物去除率的影响决定于净化系统所能承受的污染负荷,本研究净化系统的处理面积为3.0 m²,结合处理面积和入流量计算进水最高污染负荷量可知:SS为 $2.85 \times 10^{-1} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,NH₄⁺-N为 $8.12 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,NO₃⁻-N为 $2.67 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,TDP为 $5.15 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,PP为 $5.88 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,COD_{mn}为 $8.29 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。除TDP和PP略高于相关文献外,其余进水污染物负荷均与文献中相当^[1-5,7-11],实验得出除NH₄⁺-N和TDP去除率随进水浓度的增加而增加外,其他污染物去除率均呈下降趋势,尤其是颗粒态污染物的下降幅度较大。土壤-植物系统净化效果的影响因素较多,在与本研究相似坡度、流量和植被条件下,Majed Abu-Zreig^[1,11]得出SS进水负荷由 $5.18 \times 10^{-4} \sim 7.05 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 增至 $2.45 \times 10^{-3} \sim 3.17 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,其去除率由86%~98%降至68%~83%;TP进水负荷由 $3.52 \times 10^{-4} \sim 4.84 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 升至 $2.12 \times 10^{-3} \sim 2.73 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,其去除率由72%~89%降至31%~33%,SS和TP去除率均表现出随进水负荷增加而降低的现象,与本文结果一致。然而李怀恩等^[4-5]在长度10 m和15 m,坡度2%的草本及灌草复合过滤带上得出SS进水负荷为 $9.72 \times 10^{-2} \sim 2.65 \times 10^{-1} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,其去除率为92.59%~94.69%,随进水浓度增加SS去除率未出现显著变化,但溶解态氮的进水负荷由 $1.16 \times 10^{-4} \sim 1.27 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 增至 $1.96 \times 10^{-4} \sim 2.15 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,去除率由-16.22%~0.05%增至3.05%~9.86%,溶解态磷进水负荷由 $9.33 \times 10^{-7} \sim 2.68 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 增至 $4.11 \times 10^{-6} \sim 7.72 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,去除率由-106.67%~-2.33%增至27.27%~64.52%,溶解态污染物去除率随进水浓度增加而增加,与本文结果有相近之处。

分析认为,颗粒态污染物主要通过沉积过程截留,水流中细小颗粒流经土壤表面容易堵塞土壤孔隙,尤其是较小处理面积的净化系统在长时间运行后,其颗粒态污染物的截留能力所受影响较大,进水负荷增加后易于出现去除率降低的现象。而对于溶解

态污染物而言,其在土壤-系统中不仅发生物理拦截如吸附、渗滤等过程,还会产生植物吸收和微生物代谢等作用。此外,土壤中可溶性氮磷的溶出或解吸也会对出水浓度产生影响^[1,5],尤其是进水浓度较低的情况下,易于出现去除率为负值的情况,进水负荷对溶解性污染物去除率的影响更为复杂。污染物进水浓度影响净化效果的显著度和结果受到植被生长状态、运行时间、土壤质地、水力传导性和污染物性质等多方面因素的影响。

本实验得出进水流量和坡度均与污染物去除率呈负相关变化,此结果与前期单因素实验相同,也与相关文献中得出的结论一致,如C-X Jin等^[12]得出坡度是影响泥沙净化效果的显著因素之一,植株密度10 000株·m⁻²的净化体系当坡度升至6%后悬浮物去除率出现降低,而密度为2500株·m⁻²时,坡度升至4%后去除率即出现降低,然而其进水流量 $1.70 \times 10^{-3} \sim 7.00 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 对悬浮物去除率影响较小。邓娜等^[13]得出进水流量由 $7.10 \times 10^{-3} \sim 7.80 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 降至 $1.00 \times 10^{-3} \sim 2.90 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 后悬浮固体、总氮、总磷、颗粒态氮和颗粒态磷的净化效果更为显著。本文设定的进水流量范围为 $3.89 \times 10^{-5} \sim 1.32 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,相比于其他文献,偏低的进水流量可能是NH₄⁺-N和TDP去除率变化不显著的原因之一。

综上,在本文分析的4种因素中,除了植被条件和坡度是可人为控制的条件外,进水流量和污染物浓度均受到上游污染源区水土保持情况、降雨量及降雨强度的影响。当上游水土流失严重、径流泥沙负荷较大、流量较高时,在不能建设足够长度净化系统的前提下,应考虑增加植被盖度或选种地表密集度高的植被,并适当降低净化系统坡度来提高土壤-植物系统的环境功能。此外,土壤-植物系统是具有一定处理面积的自然净化系统,截留污染物转化效率较低,应根据上游污染源区农业面源污染情况及接纳水体的水质要求设计土壤-植物净化系统,并需要适时对其进行管理和维护,以保证净化系统的运行效率。

4 结论

(1)颗粒态污染物SS和PP的截留特征具有相似性,植被条件、进水浓度、流量和坡度均为极显著影响因素,土壤-高羊茅系统和土壤-紫花苜蓿系统的SS和PP去除率均显著优于对照系统,污染物去除率均呈现随进水浓度、进水流量和系统坡度的增加而减小的趋势。

(2) COD_{Mn} 的截留特征与颗粒态污染物相似,植被条件、进水浓度、流量和坡度均为极显著影响因素,土壤-高羊茅系统和土壤-紫花苜蓿系统的 COD_{Mn} 去除率均显著优于对照系统,污染物去除率随进水浓度、进水流量和系统坡度的增加而减小。

(3) 植被、浓度为 NO_3^--N 去除率的极显著影响因素,进水流量为显著因素,坡度为不显著因素。高羊茅系统对 NO_3^--N 的去除率显著优于土壤-紫花苜蓿系统,中等进水浓度时 NO_3^--N 去除率最高,而升至高等进水浓度后,去除率明显下降, NO_3^--N 去除率随进水流量的增加而降低。

(4) 植被、浓度和坡度为 NH_4^+-N 去除率的极显著影响因素,流量为不显著因素。高羊茅系统对 NH_4^+-N 的去除率显著优于土壤-紫花苜蓿系统, NH_4^+-N 去除率随进水浓度的增加而增加,随坡度的增加而呈降低的趋势。

(5) 植被为 TDP 去除率的极显著影响因素,浓度为显著因素,进水流量和坡度为不显著因素。土壤-高羊茅系统对 TDP 的去除率显著优于土壤-紫花苜蓿系统,去除率随进水浓度的增加而增加。

参考文献:

- [1] Majed Abu-Zreig, Ramesh P Rudra, Hugh R Whiteley, et al. Phosphorus removal in vegetated filter strips[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32: 613-619.
- [2] 吴健, 王敏, 吴建强, 等. 滨岸缓冲带植物群落优化配置试验研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2008, 24(4): 42-45, 52.
WU Jian, WANG Min, WU Jian-qiang, et al. Optimization of plants community of riparian buffer zones[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2008, 24(4): 42-45, 52.
- [3] 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.
WANG Min, WU Jian-qiang, HUANG Shen-fa, et al. Effects of slope and width of riparian buffer strips on runoff purification[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(10): 4951-4956.
- [4] 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.
- [5] 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]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(7): 81-86.
- [6] 林大仪. 土壤学实验指导[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004: 37.
LIN Da-yi. Soil experimental guidance[M]. Beijing: China Forestry Press, 2004: 37.
- [7] McDowell R W, Sharpley A N. Soil phosphorus fractions in solution; Influence of fertilizer and manure, filtration and method of determination[J]. *Chemosphere*, 2001, 45: 737-748.
- [8] Schmitt T J, Dosskey M G, Hoagland K D. Filter strip performance and processes for different vegetation, widths and contaminant[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1999, 28: 1479-1489.
- [9] Patty L, Rheal B, et al. The use of grass buffer strips to remove pesticides, nitrate and soluble phosphorus compounds from runoff water[J]. *Pesticide Science*, 1997, 49: 243-251.
- [10] Humberto Blanco-Canqui, Gantzer C J, Anderson S H, et al. Grass barrier and vegetative filter strip effectiveness in reducing runoff, sediment, nitrogen, and phosphorus loss[J]. *Soil Sci Soc Am*, 2004, 68: 1670-1678.
- [11] Majed Abu-Zreig, Ramesh P Rudra, Manon N Lalonde, et al. Experimental investigation of runoff reduction and sediment removal by vegetated filter strips[J]. *Hydrol Process*, 2004, 18: 2029-2037.
- [12] Jin C X, Römken M J M. Experimental studies of factors in determining sediment trapping in vegetative filter strips [J]. *Soil and Water Division of A S A E*, 2001, 44(2): 277-288.
- [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 strip[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(4): 124-129.
- [14] Janet Hussein, Bofu Yu, Hossein Ghadiri, et al. Prediction of surface flow hydrology and sediment retention upslope of a vetiver buffer strip [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 338: 261-272.
- [15] Krutz L J, Senseman S A, McInnes K J, et al. Adsorption and desorption of metolachlor and metolachlor metabolites in vegetated filter strip and cultivated soil[J]. *J Environ Qual*, 2004, 33: 939-945.
- [16] Robert P Stone, Eng P. Vegetated filter strip system design manual[M]. Toronto, Canada: Ontario Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs, 2006: 76-78.
- [17] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 第四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 243-258.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Analysts in water and wastewater[M]. The fourth. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 243-258.
- [18] 邱铁兵. 实验设计与数据处理[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2008: 106.
QIU Yi-bing. Experimental design and data processing[M]. Hefei: University of Science and Technology Press, 2008: 106.