

刘 强, 邓仕槐, 敬子卉, 等. 不同植物篱系统对坡耕地农田径流污染物的去除效果[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6): 1136–1143.

LIU Qiang, DENG Shi-huai, JING Zi-hui, et al. Removals of pollutants in surface runoff from sloping farmland using different hedgerow systems[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(6): 1136–1143.

不同植物篱系统对坡耕地农田径流污染物的去除效果

刘 强, 邓仕槐*, 敬子卉, 罗春燕, 周 鑫, 陈红春, 梁智强, 王紫麟

(四川农业大学环境学院, 成都 611130)

摘 要:采用人工模拟实验,探讨了四种植物篱系统在不同坡度(5°、10°和 20°)、不同污染物进水浓度(低、中、高)下对坡耕地农田径流污染物 TN、TP、NH₃-N、TOC、COD 的去除效果。植物篱系统分别是红叶石楠+小叶女贞+黑麦草(T1)、红叶石楠+小叶女贞(T2)、小叶女贞+黑麦草(T3)、红叶石楠+黑麦草(T4)。结果表明:植物篱系统对污染物的去除率均随坡度的增加而下降,TP、NH₃-N、COD 尤为明显,当坡度由 5°增加到 20°时,TP 的去除率由 52.25%~76.75%降至 33.68%~60.34%,NH₃-N 的去除率由 36.84%~68.33%降至 34.30%~45.46%,COD 的去除率由 13.26%~38.69%降至 3.15%~26.74%。除 NH₃-N 外,随污染物进水浓度的升高,植物篱对污染物的去除效果越明显,TP 的去除率可由 33.33%~60.11%升至 57.06%~81.44%,TOC 的去除率可由-0.84%~2.92%升至 9.64%~17.69%,COD 的去除率可由-14.75%~11.25%升至 20.62%~42.33%。植物篱系统对 TN、TP、NH₃-N、TOC、COD 的去除效果显著优于裸土(对照系统),在不同坡度下去除率最高分别能由 12.81%升至 47.02%、34.29%升至 76.75%、18.27%升至 68.33%、-0.93%升至 11.52%、2.31%升至 38.69%,在不同污染物进水浓度下分别能由 15.57%升至 53.05%、37.93%升至 81.44%、17.60%升至 64.05%、2.92%升至 17.69%、-33.40%升至 11.25%。总体而言,植物篱系统平均去除效果依次为 T1>T4>T3>T2,即红叶石楠+小叶女贞+黑麦草去除效果最佳,这与三种植物的地表覆盖率高、根系发达以及在功能上相互取长补短、协同固定污染物有关。

关键词:植物篱;坡耕地农田废水;污染物;去除效果

中图分类号:X522 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)06-1136-08 doi:10.11654/jaes.2016.06.016

Removals of pollutants in surface runoff from sloping farmland using different hedgerow systems

LIU Qiang, DENG Shi-huai*, JING Zi-hui, LUO Chun-yan, ZHOU Xin, CHENG Hong-chun, LIANG Zhi-qiang, WANG Zi-lin
(College of Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: Four hedgerow systems were designed to examine their removal efficiencies of TN, TP, NH₃-N, TOC and COD in surface runoff from farm land with different slopes (5°, 10°, 20°) at different influent concentrations (low, medium, high). The hedgerow systems included photinia fraseri + lobular privet + ryegrass (T1); photinia fraseri + lobular privet (T2); lobular privet + ryegrass (T3) and photinia fraseri + ryegrass (T4). Results showed that the removal efficiencies of the pollutants, especially TP, NH₃-N and COD, by these 4 hedgerow systems all decreased with increasing slopes. When the slope increased from 5° to 20°, the removal rates decreased from 52.25%~76.75% to 33.68%~60.34% for TP, 36.84%~68.33% to 34.30%~45.46% for NH₃-N and 13.26%~38.69% to 3.15%~26.74% for COD, respectively. Increasing influent concentrations increased the pollutant removal efficiencies by the hedgerow systems with an exception of NH₃-N. The removal rates of TP, TOC, COD by the hedgerows increased from 33.33%~60.11% to 57.06%~81.44%, -0.84%~2.92% to 9.64%~17.69% and -14.75%~11.25% to 20.62%~42.33%, respectively, as compared with the bare soil system. The removal rates of TN, TP, NH₃-N, TOC and COD by hedgerow systems were significantly higher than those in the bare soil, with the maximum removal rates increased from 12.81% to 47.02%,

收稿日期:2015-12-01

基金项目:四川省青年科技创新团队项目(2014TD0019)

作者简介:刘 强(1990—),男,四川金堂人,硕士研究生,主要从事环境生态方面的研究。E-mail:742520215@qq.com

*通信作者:邓仕槐 E-mail:453075784@qq.com

34.29% to 76.75%, 18.27% to 68.33%, -0.93% to 11.52%, and 2.31% to 38.69% under different slopes and from 15.57% to 53.05%, 37.93% to 81.44%, 17.60% to 64.05%, 2.92% to 17.69% and -33.40% to 11.25% at different influent pollutant concentrations, respectively. Overall, the average removal rate of pollutants by 4 hedgerow systems was in order of T1>T4>T3>T2, which was related to the high surface coverage, the developed root systems and the interaction among three plants to retard the pollutants.

Keywords: hedgerow; sloping farmland wastewater; pollutant; removal efficiency

目前,全球 30%~50%地表水体受到不同程度的面源污染,其中农业面源污染对地表水体的影响最大^[1-2]。虽然我国采取各种措施对此进行控制,但是农业面源污染仍然不断增加^[3],流域水体污染趋势并未得到根本改善,部分湖、河水质状况堪忧。我国作为农业大国,对农药、化肥的需求量大,农药、化肥的使用效率低下是造成农业面源污染的重要原因之一。据调查,我国坡耕地对农药、化肥的有效使用率仅为 30%,未被利用的农药、化肥随降雨或农业灌溉形成农田废水后,通过地表径流及地下渗漏等途径直接进入地表水和地下水,从而导致水体污染。

植物篱技术被广泛应用在坡耕地农田污染源和水体之间来减少污染物进入受纳水体^[4-5]。肖波等^[6]用植物篱来控制水土和土壤养分的流失,发现植物篱能使地表径流和土壤流失分别减少 63.2%和 77.7%,使土壤总氮、总磷流失分别减少 69.4%、54.2%;Lenka 等^[7-8]的研究结果表明,灌木丛和草地过滤带对印度东部坡耕地的土壤碳固定具有较大作用。大部分学者对植物篱的研究都集中在其种类选择、控制水土流失及减少土壤养分流失等^[9-12]方面,而将植物篱应用于减少坡耕地农药、化肥流失还缺乏研究。因此,利用植物篱技术来削减坡耕地农药、化肥使用后形成的农田废水径流流失,以减少氮、磷、碳等污染物的入河量,对改善水环境质量具有重要意义。本试验选择四川常见且广泛应用于生态环境修复、固土护坡、边坡绿化的 3 种植物:红叶石楠、小叶女贞和黑麦草。将三种植物进行混搭形成不同的植物篱系统,人工模拟坡耕地农田废水,研究不同坡度、不同污染物进水浓度下植物篱系统对氮、磷、碳等污染物的去除效果。研究成果可为坡耕地的农业面源污染的控制、植物篱技术的推广和重点水源地的保护提供指导依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于成都市温江区四川农业大学(103°51'E,30°42'N)一实验空地上,海拔高度为 564.4 m。该区地处成都平原腹心,其自然条件优越,属于典型的亚热带湿润季风气候区,四季分明,气候温和,雨量充沛。研究区域多年平均气温 15.9℃,平均降雨量 972 mm,全年无霜期长达 282 d,平均相对湿度 84%,平均风速 1.3 m·s⁻¹。供试土壤类型为油沙土,具体养分含量见表 1。

1.2 实验设计

1.2.1 实验装置

试验使用 1.5 m×0.5 m×0.4 m 塑料种植箱,土壤厚度为 0.35 m,填土时间为 2014 年 4 月,供试土为试验地附近坡耕地土直接转移至种植箱,未做任何处理。末端为 0.5 m×0.1 m×0.1 m 的集水槽,分别设四个出水口,作为地表径流采集样点。种植箱可调节箱体坡度。箱体最顶部上方为一可均匀控制进水量模拟降雨装置,模拟废水经降雨装置流入种植箱产生地表径流后进入植物篱系统。实验装置如图 1 所示。

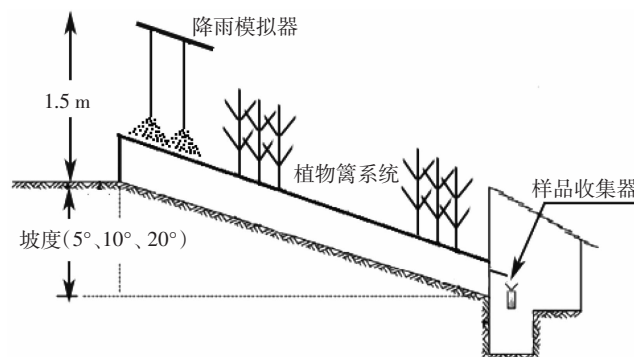


图 1 实验装置图

Figure 1 Diagram of simulating experimental system

表 1 土壤理化性质

Table 1 Physicochemical properties of tested soil

取样层 Sampling depth/cm	pH	有机质 Organic matter/g·kg ⁻¹	全氮 TN/ g·kg ⁻¹	全磷 TP/ g·kg ⁻¹	土壤含水率 Soil water content/%	孔隙度 Porosity/%	颗粒组成 Mechanical composition /%		
							沙粒 Sand	粉粒 Silt	粘粒 Clay
0~20	7.72	12.29	0.69	0.74	6.60	45.59	56.11	28.52	15.37

1.2.2 实验方案

试验设植物篱模式、坡度、污染物进水浓度 3 个因素,其中坡度设 5°、10°和 20° 3 个水平,污染物进水浓度设低、中、高 3 个水平。坡耕地农田废水采用人工配制,以碳酸氢铵作为氮源、过磷酸钙作为磷源、葡萄糖作为碳源来模拟污染元素,具体数据见表 2。植物篱模式设 5 个处理:CK 为对照系统,土壤处于裸露状态,未种植植被;T1 为红叶石楠+小叶女贞+黑麦草;T2 为红叶石楠+小叶女贞;T3 为小叶女贞+黑麦草;T4 为红叶石楠+黑麦草。种植方式均为横坡种植,植物种植在每个试验小区中上部和底部两个部分,每部分种植 3 行,总共 6 行,每行分别种植 1 种植物,每种植物均由上至下依次交替种植,各小区每种植物种植比例为等比分配,顶部与中部土壤裸露。各植物均于 2014 年 6 月栽种,栽种 4 个月后进行试验。试验前红叶石楠平均株高约 35 cm,小叶女贞平均株高约 30 cm,黑麦草平均株高约 9 cm。进行完全区组试验,共 45 种处理,每种处理重复 2~3 次。

表 2 污染物进水浓度

Table 2 Influent concentrations of pollutants

处理水平 Level	污染物进水浓度 Influent concentrations of pollutants/mg·L ⁻¹				
	TN	TP	NH ₃ -N	TOC	COD
低浓度 Low concentration	4.29	0.29	1.08	26.00	56.32
中浓度 Medium concentration	7.94	0.49	1.47	37.51	112.00
高浓度 High concentration	13.01	1.16	2.64	72.81	208.00

采用流量计控制降雨强度为 9.2 mm·d⁻¹,连续降雨至实验结束。模拟地表径流开始后,采集进水样和径流出水样,进水样每隔 10 min 采集一次,共采集 3 次,出水样持续收集,整个实验周期约 30 min。试验过程中对每个试验小区的出水口进行均匀采样,分别混合得到各个小区的待测液,水样采集后即刻采用标准方法^[13]进行分析。

1.2.3 数据分析

根据 $R = (C_1 - C_0) / C_1 \times 100\%$ 计算污染物去除率,其中 C_1 、 C_0 分别为进水样、出水样污染物浓度,mg·L⁻¹; R 为百分去除率。使用 SPSS 20.0 计算试验数据均值与标准误,同时进行方差分析与多重比较。使用 Origin 8.5 绘图。

2 结果与分析

2.1 不同坡度下植物篱系统对污染物的去除效果

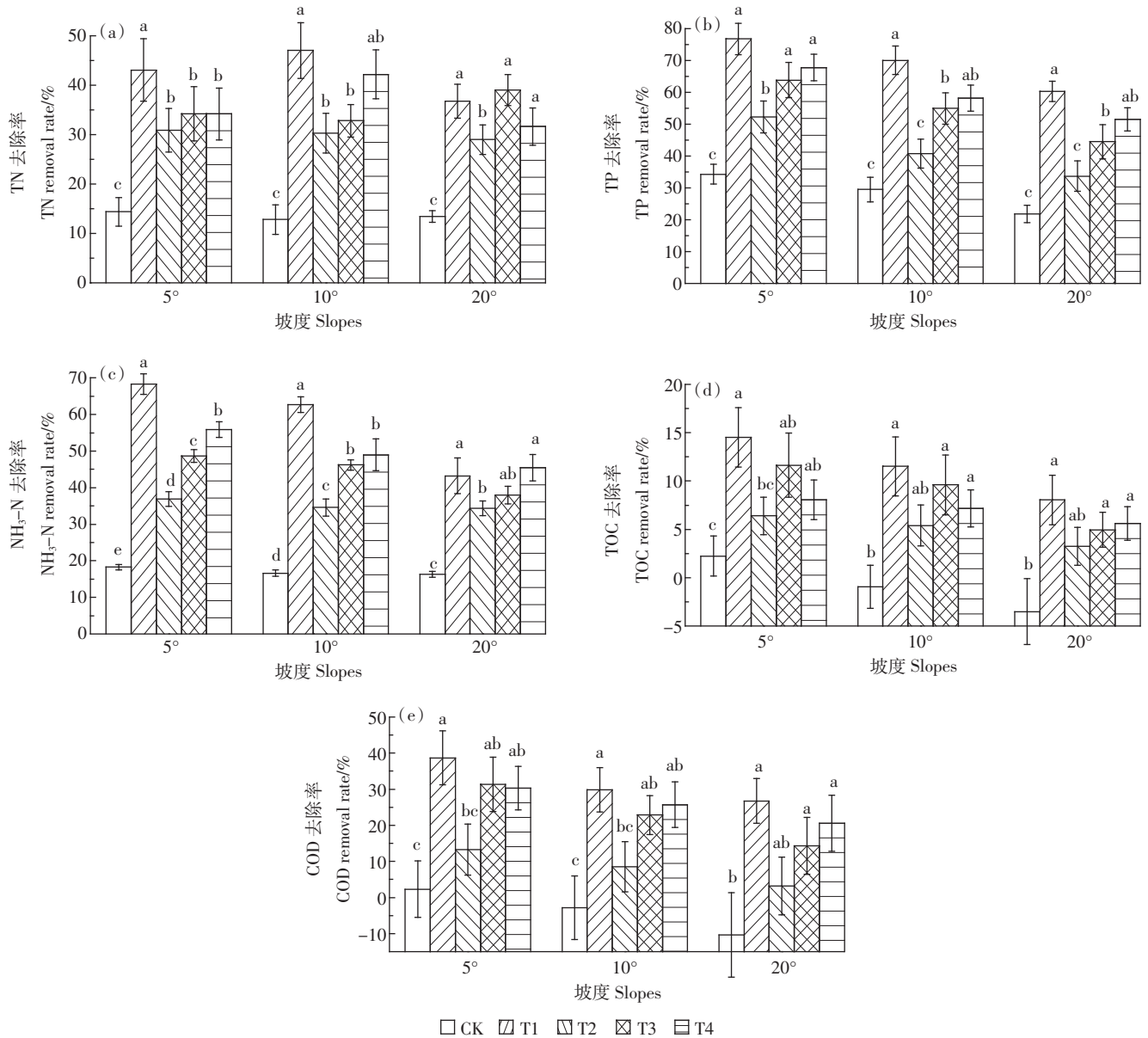
通过测定进出水中各种污染物的浓度确定去除率,在坡度为 5°、10°、20°下各处理对污染物的去除效果见图 2。

地表径流作为氮、磷元素流失的主要驱动力,氮主要以溶解态、磷主要以颗粒态^[14-15]参与其中,各处理在不同坡度下对 TN、TP 的去除效果如图 2a、图 2b 所示。

与对照系统比较,对 TN 去除率最高的植物篱系统为 T1 处理。在 5°、10°、20°下对 TN 的去除率分别从 14.38%增至 43.07%、12.81%增至 47.02%、13.04%增至 38.61%,相对于对照系统去除率提高了 2~3 倍。T2、T3、T4 对 TN 的去除在 5°、10°下无显著差异,但在 20°下差异显著,虽然三个处理的去除率均低于 T1,但仍显著高于对照系统。王敏等^[16]研究表明,2%坡度下植物缓冲带对 TN 的降解能力最强,5%坡度下最弱。本试验中 TN 的去除与之类似,仅 T3 处理出现了在 20°时 TN 去除率略有增加的现象。

由图 2b 可知,对照系统在 5°时对 TP 的去除率为 34.29%,20°时仅为 21.86%,与黄利玲等^[17]在三峡库区研究所得出的旱坡地在地表径流条件下磷素的流失量为 17°>9°>4°的结论一致。植物篱系统在 5°、10°、20°下 TP 去除率分别在 52.52%~76.75%、40.79%~70.05%、33.68%~60.35%之间,其中 T1 去除效果最佳,在 5°时的去除率能由对照的 34.29%增加到 76.75%,T4 与 T3 差异不显著。随着坡度的增加,T1、T2、T3、T4 处理对 TP 的去除率分别由 76.75%、52.25%、63.81%、67.77%下降到 60.34%、33.68%、44.47%、51.53%。其中的原因可能是坡度增加后,相同降雨强度下系统中径流的速度变大,模拟废水中的颗粒态污染物跟着土粒随着水流向下坡移动,最后进入待测系统,致使植物篱系统对于 TP 的去除率迅速下降。

由于土壤胶体颗粒具电负性,极易吸附小分子溶解性氮(NH₃-N),且NH₃-N能被植物直接吸收,物理吸附与生物吸附的双重作用使得植物篱系统对 NH₃-N 具有极高的去除率,去除效果见图 2c。T1 处理对 NH₃-N 的去除率在 5°下能达到 68.33%,远高于对照系统的 18.27%,T2 处理的去除率较 T1、T3、T4 处理小。与 TP 相似,随着坡度的增加,植物篱系统对 NH₃-N 的去除效果逐渐变差,T1、T2、T3、T4 处理对 NH₃-N



图中不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。下同

Different lowercase letters indicate significant differences($P<0.05$) between treatments. The same below

图 2 各处理在不同坡度下对污染物的去除效果

Figure 2 Pollutant removal efficiencies by hedgerows in land with different slopes

去除率分别由 68.33%、36.84%、48.68%、55.95%下降到 43.21%、34.30%、37.93%、45.46%。

各处理在不同坡度下对 TOC、COD 的去除见图 2d、图 2e。裸土对 TOC、COD 的去除极低,在 10°、20°下对两种污染物的去除率出现负值,在 20°时 TOC 去除率为-3.51%,COD 去除率甚至达到了-10.37%。其原因可能是一方面本试验对照系统(裸土)对土壤无覆盖度,外加地面坡度较高,导致系统的固碳效应不明显,与王文欣等^[18]所得出的结论一致;另一方面是

由于土壤中自身碳元素伴随着污染物一并进入待测系统,待测液中 TOC 与 COD 含量增加,导致去除率为负。在 5°、10°、20°下植物篱系统对 TOC 去除率分别仅在 6.39%~14.53%、5.40%~11.52%、3.25%~8.04%之间。T1、T3、T4 与 CK 差异显著,而 T2 与 CK 无显著差异,各处理对 TOC 的去除效果均随坡度的增加而变差。同样,植物篱系统对 COD 的去除也表现出一定的规律性。T1、T3、T4 间无显著差异,但他们与 CK 差异显著;T2 与 CK 差异不显著。随着坡度的增加,T1、

T2、T3、T4 处理对 COD 的去除率分别由 38.69%、13.26%、31.36%、30.32% 下降到 26.74%、3.15%、14.35%、20.57%。分析认为:模拟废水流经系统时,虽然植物篱能迅速降低径流对土壤团聚体的破坏,提高系统的稳定性,减少对系统的侵蚀,降低废水中碳元素的流失,但由于本试验土壤中沙粒与粉粒所占比重较大,导致植物篱对系统的稳定效果并未完全体现出来,从而导致植物篱对碳元素的去除率较低。尽管如此,植物篱系统对 TOC、COD 的去除率仍优于裸土,T1 对 TOC 的去除率在 10° 时能从 -0.93% 增至 11.52%,对 COD 的去

除率在 5° 时能从 2.31% 增至 38.69%。

2.2 不同污染物进水浓度下植物篱系统对污染物的去除效果

各处理在不同污染物进水浓度下对污染物的去除效果见图 3。

不同污染物进水浓度下,植物篱系统对 TN 的去除效果显著优于对照系统,T1 去除效果最佳,在低、中、高浓度下的去除率较对照系统分别从 6.88% 增至 28.04%、从 15.57% 增至 53.05%、从 18.18% 增至 45.77%。随着污染物进水浓度的增加,植物篱对 TN

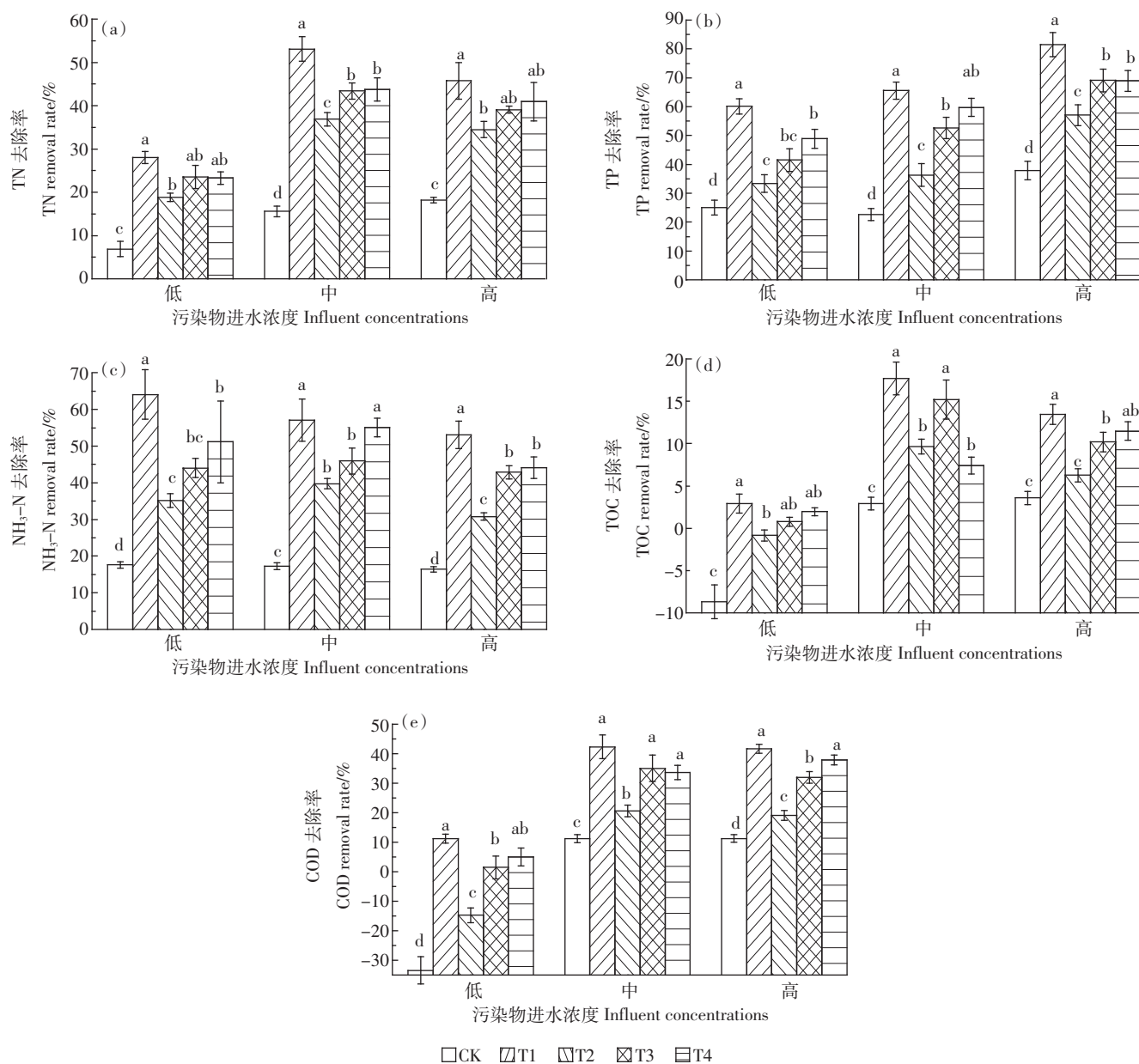


图3 各处理在不同污染物进水浓度下对污染物的去除效果

Figure 3 Pollutant removal efficiencies by hedgerows in sloping land with different influent concentrations

的去除率先增大后减小,但总体呈增大的趋势,如图3a所示。低浓度条件下,植物篱系统对TN去除效果较弱,T1、T3、T4差异不显著,T2、T3、T4差异不显著,T1、T2差异显著。中浓度条件下,植物篱系统对TN去除效果达到最佳,T3、T4差异不显著,其余均差异显著,T1处理的去除率最高,为53.05%,去除率最低的T2处理也能达到36.87%,远高于对照系统15.57%的去除率。高浓度条件下,植物篱系统对TN的去除效果较中浓度稍有减弱,但仍能达到至少34.45%的去除率。

由图3b可以看出,植物篱系统对TP的去除率随污染物进水浓度的增加而增大,在低、中浓度下的去除率较低,随着污染物进水浓度的增加,T1、T2、T3、T4处理对TP的去除率分别由60.11%、33.33%、41.52%、48.87%上升到81.44%、57.06%、69.07%、68.91%。李怀恩等^[19]研究得出,草地过滤带、沙棘-草本过滤带在入流浓度较高时对TN的削减率分别由56.82%、55.01%增加到68.03%、65.72%;TP的削减率分别由85.46%、84.44%增加到89.73%、87.87%。这与本文结果有相似之处。在低、中、高浓度下各植物篱系统对TP的去除率分别为33.33%~60.11%、36.32%~65.58%、57.06%~81.44%,而对照系统分别仅为25.09%、22.61%、37.93%。本试验中TP的去除效果较TN好,与史静等^[20]的研究结论相反,可能的原因是试验小区土壤孔隙度较大,加之设定的降水流量较小,使颗粒态磷大量截留在植物篱系统中,而溶解态氮则随着径流部分流失。

植物篱系统对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效果随着污染物进水浓度的增加逐渐变差(图3c),T1、T2、T3、T4处理对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率分别由64.05%、35.17%、44.01%、51.17%下降到53.10%、30.79%、42.86%、44.15%。霍炜洁等^[21]在研究高羊茅和紫花苜蓿植物篱系统时也得出了相似的结论,即浓度增加的同时,高羊茅系统的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率从63.44%下降到34.33%,紫花苜蓿系统则从59.2%下降到22.75%。本试验中各植物篱系统与对照系统均差异显著。在低、中、高浓度下植物篱系统对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率分别在35.17%~64.05%、39.77%~57.08%、30.80%~53.10%之间,远大于对照系统的17.60%、17.25%、16.42%。

如图3d、图3e所示,植物篱系统对TOC、COD这两种污染物的去除率不高,但相对于对照系统表现出很大的去除优势。T1处理对TOC、COD的去除率最大,在中浓度条件下去除效果最佳,其去除率较裸土

分别从2.92%增至17.69%、从11.21%增至42.33%。植物篱系统对TOC、COD的去除效果随浓度的增加呈现相似的规律。T1、T2、T3、T4处理对TOC的去除率分别由2.92%、-0.84%、0.76%、1.96%上升到17.69%、9.64%、15.21%、11.49%,对COD的去除率分别由11.25%、-14.75%、1.48%、5.04%上升到42.33%、20.62%、35.07%、37.87%。但在高浓度下T2与CK没有显著性差异,甚至T2在低浓度下与CK一样,对TOC、COD的去除率出现负值。其原因可能是T2处理的红叶石楠、小叶女贞均属直立生长、单株型植物,分枝仅在植株上部较多,模拟径流经过该系统时,降雨强度始终维持在一个标准的情况下该进水在系统停留时间、系统与污染物反应时间较其他系统短,因此携带出比其他系统更多的碳元素;另外,污染物进水浓度本身很小,系统中微生物固定、植被吸收等作用致使TOC、COD的去除出现以上情况。随着浓度的增加,各处理对于TOC、COD的去除逐步趋于正常,对COD的去除率能够维持在30%左右。

3 讨论

在模拟废水流经植物篱系统时植物对污染物进行截留,各植物篱系统对污染物的去除效果明显优于裸土,目前相关研究均得到一致结论^[6,22]。本研究中红叶石楠、小叶女贞、黑麦草都具有非常发达的根系,在吸收污染物的同时,可改善土壤的渗透能力,增加土壤微生物降解污染物所需的氧;而且红叶石楠和小叶女贞枝叶紧密、繁茂,黑麦草生长密集、蔓延性能强,能有效阻滞径流,增加植株地上部分对污染物阻截,并通过叶片吸附、叶内转化等作用对污染物予以去除。随着坡度的增加,各植物篱系统对污染物的去除效果减弱,归因于坡度增加的同时导致径流速率加快,径流量增大,系统养分流失量更大^[23],这一现象说明,在坡度较大的坡耕地农田中,构建植物篱系统不足以将污染物的流失控制到相应水平^[24-25]。植物篱系统在中、高污染物进水浓度下对污染物显现出更大的去除优势,分析认为污染物进水浓度的升高会使植物根系滞留作用增强,根际微生物的活性也增强,对污染物的去除效果明显提升。李怀恩等^[19]、Abuzreig等^[26]研究表明地表径流流经土壤时,土壤中的氮、磷可通过溶出与解吸对出水浓度产生影响,致使在污染物进水浓度较低的情况下,易出现去除率为负值的情况,但本研究中负值却出现在对TOC与COD的去除中,其具体原因还需作进一步的研究。另外,不同植物篱

系统对污染物的去除效果截然不同,T1处理最好,T4处理略优于T3处理,最后为T2处理,即红叶石楠+小叶女贞+黑麦草>红叶石楠+黑麦草>小叶女贞+黑麦草>红叶石楠+小叶女贞。原因可能是黑麦草生长密集、分蘖多,地表覆盖性能较红叶石楠与小叶女贞好,有效滞缓分散了地表集中径流,最大限度地避免形成暂时小型沟壑,减小污染物随径流成股下流^[27]。因而黑麦草与红叶石楠或小叶女贞其中任意一种植物组合后的去除效果比红叶石楠+小叶女贞组合更好,表现为T3、T4处理对污染物的去除率大于T2。红叶石楠+小叶女贞+黑麦草对污染物的去除效果则明显优于其他处理,三种植物共生于实验田时互相协调,固定土壤、固定污染物能力更强。分析认为,除土壤条件、植被生活习性,根系发达程度等因素外,植株较高、刚性较强^[28]的红叶石楠抵御径流的能力强,小叶女贞沉积、吸附效果佳,与黑麦草组合后三种植物的作用相互交叉甚至叠加是其去除污染物能力强的主要原因。

4 结论

(1)植物篱系统在不同坡度下对TN、TP、NH₃-N、TOC、COD的去除率均优于对照系统。在5°、10°的较低坡度下,污染物在植物篱下的去除率较高,随着坡度的增大,植物篱对污染物的去除效果变差,TP、NH₃-N、COD表现明显,而TN、TOC变化不大。

(2)植物篱系统在不同污染物进水浓度下对TN、TP、NH₃-N、TOC、COD的去除率均优于对照系统。在低浓度下,各处理对污染物TN、TP、TOC、COD的去除率较低,在中、高浓度时去除率较高,尤其是TP、TOC、COD;各处理对NH₃-N的去除率随污染物进水浓度上升有小幅下降。

(3)不同植物篱系统对污染物都表现出极好的去除效果,其中红叶石楠+小叶女贞+黑麦草的去除效果最佳,红叶石楠+黑麦草、小叶女贞+黑麦草次之。

参考文献:

- [1] Gu Q H, Li Y D, Sun J S. Analysis of the causes of agriculture non-point source pollution in Jilin[J]. *Science & Technology Information*, 2011, 11:11-12.
- [2] Ma J L. Research on controlling technology of slope land non-point pollution in Liao River Source Area[J]. *Northern Environment*, 2011, 23(5):168-169.
- [3] 中华人民共和国环境保护部,国家统计局,农业部. 第一次全国污染源普查公报[EB/OL]. (2010-02-06)[2011-07-11]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201002/t20100210_1_85698.htm.
- [4] Duchemin M, Hogue R. Reduction in agricultural non-point source pollution in the first year following establishment of an integrated grass/tree filter strip system in southern Quebec (Canada)[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 131(1/2):85-97.
- [5] Borin M, Passoni M, Thiene M, et al. Multiple functions of buffer strips in farming areas[J]. *European Journal of Agronomy*, 2010, 32(1):103-111.
- [6] 肖波,王慧芳,王庆海,等. 坡耕地上等高草篱的功能与效益综合分析[J]. 中国农业科学, 2012, 45(7):1318-1329.
- [7] XIAO Bo, WANG Hui-fang, WANG Qing-hai, et al. Function and cost benefits of contour grass hedges on sloping croplands[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(7):1318-1329.
- [8] Lenka N K, Dass A, Sudhishri S, et al. Soil carbon sequestration and erosion control potential of hedgerows and grass filter strips in sloping agricultural lands of eastern India[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 158(6):31-40.
- [9] Lenka N K, Sudhishri S, Dass A, et al. Soil carbon sequestration as affected by slope aspect under restoration treatments of a degraded alfisol in the Indian sub-tropics[J]. *Geoderma*, 2013, 204-205(4):102-110.
- [10] Donjadee S, Tingsanchali T. Reduction of runoff and soil loss over steep slopes by using vetiver hedgerow systems[J]. *Paddy & Water Environment*, 2013, 11(1-4):573-581.
- [11] Salvador B S, Comu S, Couturier A, et al. Morphological and geochemical properties of soil accumulated in hedge induced terraces in the massif central, France[J]. *Soil & Tillage Research*, 2006, 85(1):62-77.
- [12] Cullum R F, Wilson G V, McGregor K C, et al. Runoff and soil loss from ultra-narrow cotton plots with and without stiff-grass hedges[J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 93(1):56-63.
- [13] 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.
- [14] SHEN Xiao-bo, CHEN Chuan-sheng, 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.
- [15] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [16] State Environmental Protection Administration. Methods for the monitoring and analysis of water and wastewater[M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [17] 陈玲,刘德富,宋林旭,等. 不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究[J]. 环境科学, 2013, 34(6):2151-2158.
- [18] CHEN Ling, LIU De-fu, SONG Lin-xu, et al. Characteristics of nutrient loss by runoff in sloping arable land of yellowbrown under different rainfall intensities[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(6):2151-2158.

- [15] 汪庆兵, 李泽波, 张建锋, 等. 浙北毛竹林地表径流氮磷流失特征[J]. 生态学杂志, 2014, 33(9):2471-2477.
WANG Qing-bing, LI Ze-bo, ZHANG Jian-feng, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus loss by surface runoff in Moso bamboo stands in Northern Zhejiang Province[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(9):2471-2477.
- [16] 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.
- [17] 黄利玲, 王子芳, 高 明, 等. 三峡库区紫色土旱坡地不同坡度上土壤磷素流失特征研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(1):30-33.
HUANG Li-ling, WANG Zi-fang, GAO Ming, et al. Study on phosphorus loss characteristics from different slopes in purple soil sloping upland of Three Gorges Reservoir Region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(1):30-33.
- [18] 王文欣, 庄义琳, 庄家尧, 等. 不同降雨强度下坡地覆盖对土壤有机碳流失的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4):62-66.
WANG Wen-xin, ZHUANG Yi-lin, ZHUANG Jia-yao, et al. Effects of downhill coverage on soil organic carbon loss under different rainfall intensities[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(4):62-66.
- [19] 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.
- [20] 史 静, 卢 湛, 张乃明. 混播草带控制水源区坡地土壤氮、磷流失效应[J]. 农业工程学报, 2013, 29(4):151-156.
SHI Jing, LU Chen, ZHANG Nai-ming. Effects of mixed grass strip on controlling nitrogen and phosphorus loss of slope land in water source region[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(4):151-156.
- [21] 霍炜洁, 周怀东, 刘玲花, 等. 土壤-植物系统净化地表径流非点源污染物实验研究[J]. 水利水电技术, 2013, 44:26-31.
HUO Wei-jie, ZHOU Huai-dong, LIU Ling-hua, et al. Experimental study on removal of non-point pollutants in surface runoff with soil-vegetation system[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2013, 44(6):26-31.
- [22] Wang T, Zhu B, Xia L Z. Effects of contour hedgerow intercropping on nutrient losses from the sloping farmland in the Three Gorges Area, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2012, 9(1):105-114.
- [23] 周 璟, 何丙辉, 刘立志, 等. 坡度与种植方式对紫色土侵蚀与养分流失的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(2):239-243.
ZHOU Jing, HE Bing-hui, LIU Li-zhi, et al. Effect of slope and planting mode on erosion and nutrient loss in purple soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(2):239-243.
- [24] 黄传伟, 牛德奎, 黄 顶, 等. 草篱对坡耕地水土流失的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 22(6):40-43.
HUANG Chuan-wei, NIU De-kui, HUANG Ding, et al. Effects of grass hedgerows on runoff and soil erosion on slope land[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 22(6):40-43.
- [25] Xiao B, Wang H F, Wang Q H, et al. Functions and cost benefits of contour grass hedges on sloping croplands[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(7):1318-1329.
- [26] Abuzreig M, Rudra R P, Whiteley H R, et al. Phosphorus removal in vegetated filter strips[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32(2):613-619.
- [27] Robert P S, Eng P. Vegetated filter strip system design manual[M]. Toronto:Ontario Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs, 2006:76-78.
- [28] 王晓燕. 植被刚度对水流阻力特性影响的研究[D]. 南京:河海大学, 2007.
WANG Xiao-yan. The effect of vegetation rigidity on flow resistance [D]. Nanjing:HoHai University, 2007.