

多孔生态混凝土基质生态系统对模拟农田 尾水处理效能的试验研究

徐 微,张 松,高 松,张 震

(安徽农业大学资源与环境学院,安徽 合肥 230036)

摘 要 目的 研究多孔生态混凝土系统(Ecol-co 系统)对模拟农田尾水中总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})的净化效能,得出较适宜的净水植物,分析系统对各污染物的去除机制.方法 采用自制 Ecol-co 小试装置,设置空白对照、无植物 Ecol-co、水菖蒲、空心菜、茭白、黑麦草 Ecol-co 6 个试验组,以模拟农田尾水为试验原水,在高、中、低 3 个进水污染物质量浓度水平下开展试验.黑麦草 Ecol-co 组试验在冬季进行,其余试验均在夏秋季进行.结果 夏秋季种植水菖蒲、空心菜和茭白的植物 Ecol-co 试验系统对 TN、TP 及 COD_{Mn} 的去除率可分别达到 40% ~ 82%、90% ~ 99%、65% ~ 95%;冬季种植黑麦草 Ecol-co 系统对 TN、TP 及 COD_{Mn} 的去除率分别为 50% ~ 64%、94.44% ~ 99.9%、73% ~ 85%;Ecol-co 系统对各污染物的去除率明显高于空白对照系统;种植植物 Ecol-co 试验系统的 TN 去除率较无植物 Ecol-co 系统有显著提高.结论 Ecol-co 系统处理模拟农田尾水时,可获得较好地去除 TN、TP 及 COD_{Mn} ;填充生态混凝土基质可明显提升 TN、TP 及 COD_{Mn} 的去除效能;种植水生植物对 TN 去除有显著的促进作用.夏秋季节,水菖蒲、空心菜为较适宜的水生植物,黑麦草则适于在冬季种植.

关键词 生态混凝土;生态沟渠;农田尾水;面源污染

中图分类号 X52

文献标志码 A

Efficiency of an Ecological System with Novel Polyporous Ecological Concrete as Matrix in Treating Synthetic Farmland Drainage Water

XU Wei, ZHANG Song, GAO Song, ZHANG Zhen

(School of Resources & Environment, Anhui Agricultural University, Hefei, China, 230036)

Abstract: The aim of this paper is to study the efficiency of an ecological system with ecological

收稿日期:2020-05-25

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD0800301-05);安徽省高等学校自然科学研究重大项目(KJ2017ZD16);江苏省太湖污染控制与治理科技项目(TH2018403)

作者简介:徐微(1977—),女,副教授,博士,主要从事污染控制方面研究.

concrete as matrix (Ecol-co system) on removing total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and Permanganate index (COD_{Mn}) from synthetic farmland drainage water, then obtain a more suitable water-purifying plant, and analyze the removal mechanism of each pollutant by the system. An experiment was performed using self-designed devices containing control system, no planting system, alamus Ecol-co system, water spinach Ecol-co system, zizania aquatica Ecol-co system and ryegrass Ecol-co system, respectively, with synthetic farmland drainage water as tested water. Three influent contaminants concentration level were adopted in the experiment. Those experimental Ecol-co systems (water calamus, water spinach and water chestnut) removed TN, TP and COD_{Mn} at 40% ~ 82%、90% ~ 99%、65% ~ 95%, respectively in summer and autumn. 50% ~ 64%、94.44% ~ 99.9%、73% ~ 85% removals of TN, TP and COD_{Mn} were achieved by the Ecol-co systems with ryegrass in winter. The removals of TN, TP and COD_{Mn} achieved by the Ecol-co systems were greater than that exerted by the control treatment overall; the Ecol-co system with plants removed TN at a greater efficiency than that of without plants. In summary, Ecol-co system could effectively eliminate TN, TP and COD_{Mn} ; ecological concrete was observed to be significantly favorable to the removals of those three contaminants; aquatic plants in the system could observably improve the TN removals, calamus, water spinach and ryegrass (in winter) were appropriate for the system according to this study.

Key words: ecological concrete; ecological ditches; farmland drainage water; non-point source pollution

我国农业面源污染是造成水体氮、磷含量升高的主要原因之一,其贡献率可能超过来自城市生活污水和工业废水的点源污染^[1-2].携带氮、磷等污染物的农田尾水是农业面源污染的重要组成部分.近30年来我国农田化肥施用数量增加到原来的4倍,而肥料的利用率却不足40%^[3-4],未被利用的养分随径流进入水体,加重水体富营养化程度^[5-6].农田排水沟渠是农田径流或灌溉产生的农田尾水向水体排放的通道^[7],如在其中构建生态系统,可发挥重要的水质净化功能.然而,由于可生长植物的土质沟渠一般面临沟壁或沟底受水流冲刷而出现侵蚀和坍塌^[8],当前大部分农田排水沟渠仍采用传统的混凝土作为护砌,因无法在沟渠内种植净水植物、难以富集微生物,使其污染物削减作用较为有限.当前,沟渠的结构稳定性与生态属性之间的矛盾是生态沟渠技术发展中亟待解决的问题之一.生态混凝土^[9-10]为近年来出现的一种新型护砌材料,具有特殊的多孔结构,在保持较高的机械强度的同时,兼具透水、透气性能,通过适当构型设计,可生长植

物以及作为微生物载体.目前我国已经开始应用于河湖基底及护坡的构建,在水体保护和污染修复工程中发挥了重要的作用.将生态混凝土用作农田排水沟渠的护砌材料,可在沟渠内构建生态系统,实现水质净化效果,突破当前生态沟渠存在的技术局限性.采用新型多孔生态混凝土作为护砌材料构建的生态沟渠,本质上是以生态混凝土为基质的生态系统(Ecol-co系统).明确这类系统对农田尾水中主要污染物的去除效能是推进生态混凝土材料应用于农田生态沟渠构建的重要前提.笔者采用自行设计的试验装置,以模拟农田尾水为试验原水,进行小试研究,在不同进水污染物质量浓度水平、不同种植植物条件下,分析Ecol-co系统对有机物、氮、磷等污染物的去除效能,得出较适宜的净水植物,分析系统对各污染物的去除机制,为相关技术的进一步研究、应用提供依据.

1 试 验

1.1 试验方案

实际的农田排水沟渠多具有一定的调蓄

容积,达到溢流水位后排出.农田尾水在沟渠内的滞留时间取决两次产生溢流的降雨事件之间的晴天历时,最高可达几十天.在农田尾水滞留期间,生态沟渠相当于一个静态反应器,通过植物、微生物、化学等多重作用实现污染物的削减.笔者将模拟 Ecol-co 系统对降雨后滞留于沟渠内的农田尾水的净化效果,试验采用敞口试验装置在室外开展试验,模拟多孔混凝土生态沟渠内的污染物去除过程.试验装置主体为 PVC 材质,长宽高分别为 $0.5\text{ m}\times0.3\text{ m}\times1\text{ m}$.装置进水孔距底部 20 cm ,直径为 15 mm ,在出水一侧距底部开 4 个直径为 9.5 mm 的出水孔,试验水深为

10 cm .试验装置置于塑料大棚内.试验装置底部填充 $18\sim19\text{ cm}$ 厚度的生态混凝土.用于试验的生态混凝土材料采用砾石作为骨料,通过与一定比例的水泥、粉煤灰胶结剂、萘系减水剂混合制成,孔隙率为 $20\%\sim35\%$.生态混凝土层顶部有直径约为 2 cm 的若干孔洞,孔洞内填充土壤基质,利于植物的固定生长.刚制备完成的生态混凝土呈现较强的碱性, $\text{pH}>12$.在种植植物之前,装置连续进出清水,直至出水 pH 降至 $8\sim10$,同时在填充的土壤基质中加入适量硫磺粉,可进一步降低 pH 至 $7.5\sim8.5$.

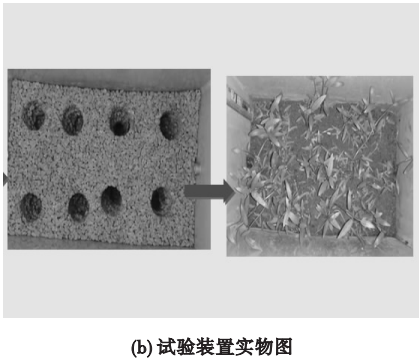
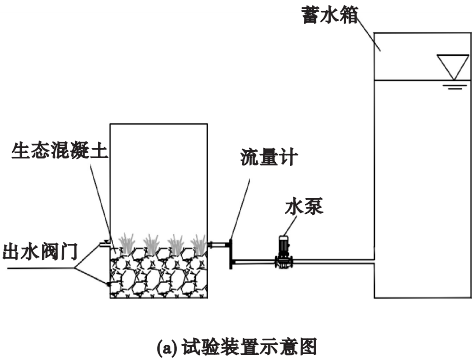


图 1 试验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of the test device

1.2 试验设计

1.2.1 试验设置

笔者设置 6 个试验组,包括空白对照组、无植物 Ecol-co 试验组、水菖蒲(*Acorus calamus* L) Ecol-co 试验组、茭白(*Zizania latifolia*) Ecol-co 试验组、空心菜(*Ipomoea aquatica* Forsk) Ecol-co 试验组、黑麦草(*Lolium perenne* L) Ecol-co 试验组.其中,空白对照组即不填充任何基质也不种植水生植物.黑麦草 Ecol-co 组试验在 2019-11-15 至 2019-12-19 进行,试验期间水温为 $8.1\sim17.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (冬季);其余试验在 2019-08-25 至 2019-09-27 进行,试验期间水温为 $27.4\sim30.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (夏秋季).

1.2.2 试验原水

以尿素为氮源、磷酸二氢钾为磷源、葡萄

糖为溶解性有机质来源配制试验原水.模拟农田尾水污染物的试验范围^[11]设置高、中、低 3 个质量浓度水平.各质量浓度水平下,进水污染物的目标质量浓度值如表 1 所示.

表 1 各质量浓度水平污染物的目标质量浓度值
Table 1 Mass concentration values of pollutants

质量浓度水平	$\rho(\text{TN})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
高	30	1.2	130
中	15	0.72	90
低	8	0.5	40

采用静态试验方式,在每一个质量浓度水平下,连续运行 3 个试验周期,周期间无间断,根据预试验确定每周期 11 d,第 1 天加入模拟农田尾水后立刻取样,此后每隔 2 d 采

集一次水样,检测水样中 TN 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 TP 和 COD_{Mn} 的质量浓度. 基于检测数据得出不同条件下,试验装置内各污染物质量浓度的动态变化,并进一步分析 Ecol-co 系统对各污染物的去除效能与机制. 为避免水分蒸发对污染物质量浓度产生干扰,在每次采样前向试验装置内添加蒸馏水至恒定水位.

1.3 检测项目及方法

试验水质分析项目主要包括总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})以及硝态氮($\text{NO}_3^- \text{-N}$). 所有指标均根据《水和废水监测分析方法》(第四版)国家标准测定方法进行检测. 为避免藻类及悬浮微生物对检测结果造成影响,取自空白对照组的水样在检测前用定性滤纸过滤去除悬浮物质;Ecol-co 试验系统可通过生态混凝土过滤水中悬浮物,

则不需任何预处理.

1.4 计算污染物去除率

各污染物的去除率,根据进出水污染物 TN 、 TP 、 COD_{Mn} 的质量浓度计算各污染物去除率:

$$\rho = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100\% .$$

(1)

式中: ρ 为污染物去除率,% ; C_0 表示进水中 TN 、 TP 、 COD_{Mn} 的质量浓度, mg/L ; C_1 表示出水中 TN 、 TP 、 COD_{Mn} 的质量浓度, mg/L .

2 结果与分析

2.1 系统对 TN 去除效果

图2为不同条件下,一个处理周期内各试验系统中 TN 质量浓度的动态变化及处理周期末的 TN 去除率.

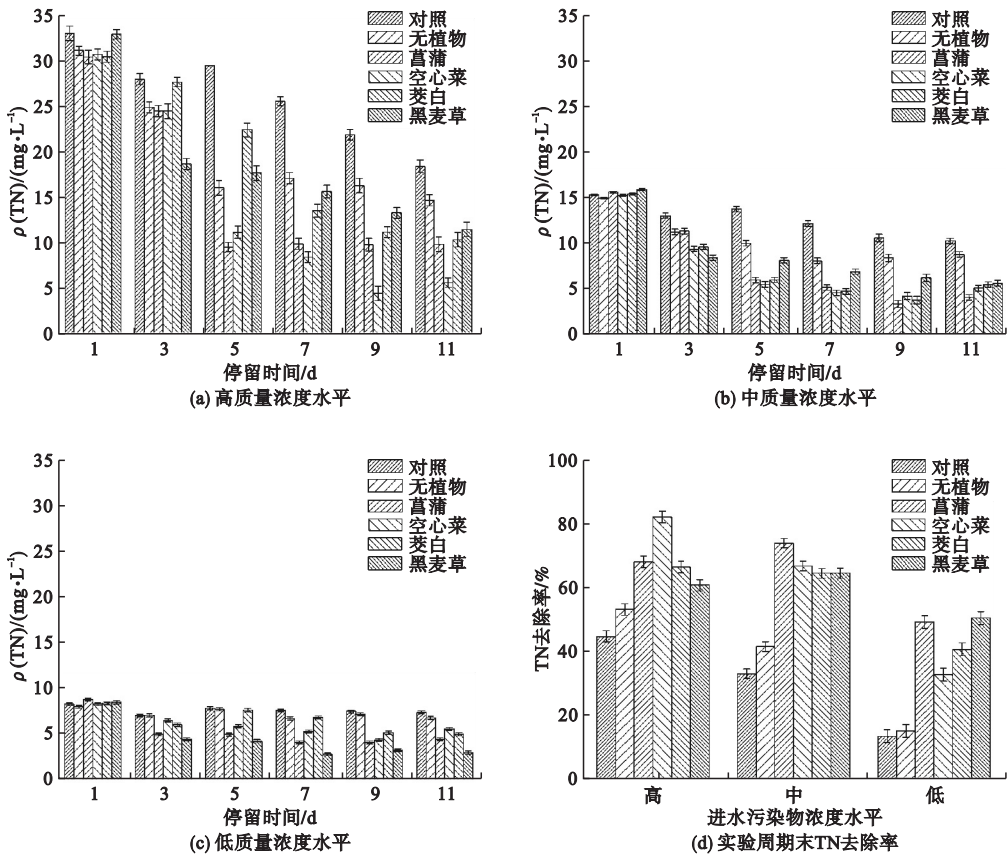


图2 一个处理周期内各试验系统中的 TN 质量浓度动态变化以及实验周期末 TN 去除率

Fig. 2 Dynamic change of TN mass concentration within one treatment cycle and TN removal rate at the end of the test cycle

随着停留时间的延长,各处理中 TN 质量浓度呈逐渐下降趋势,第 7 天至第 9 天后降至最低水平(见图 2(a)、(b)、(c)). 一个处理周期末,空白对照组对 TN 的平均去除率为 13% ~ 45%. 无植物 Ecol-co 系统对 TN 的平均去除率明显高于空白对照组,达到了 15% ~ 53%. 种植水生植物的 Ecol-co 系统对 TN 的去除效果与无植物 Ecol-co 系统相比有明显提高(见图 2(d)). 植物种类对 TN 去除效果存在一定影响,种植水菖蒲的试验系统在各进水污染物质量浓度水平下均表现出相对较好的 TN 去除效果,平均去除率可达 49% ~ 74%;种植空心菜的试验系统在高、中两个进水污染物质量浓度水平下,可获得相对较高的 TN 去除率,平均为 66% ~ 82%. 种植茭白的试验系统对 TN 的去除效果则介于其他系统之间,在各进水污染物质量浓度水平下,平均去除率为 40% ~ 66%. 冬季,种植黑麦草试验系统可保持较好的 TN 去除效果,平均去除率达到了 50% ~ 64%. 总体上, TN 去除速率及去除率随进水 TN 质量浓度的升高而增大. 空白对照组对 TN 的去除应主要依靠水中滋生的藻类的固氮作用以及微生物的同化作用^[12]. 无植物 Ecol-co 系统对 TN 的去除效果明显高于空白对照组,一个重要原因在于:生态混凝土的特殊孔隙结构可使其成为较好的生物膜载体^[13],使脱氮功能微生物得到富集与强化. 试验过程中溶解氧的时空变化可创造生物脱氮所需的好氧、缺氧环境.

种植水生植物可进一步促进 TN 的去除(见图 2). 一方面植物自身生长过程中可吸收一部分氮素^[14];另一方面种植水生植物可显著提高生态系统内微生物丰富度、多样性和脱氮功能微生物的丰度^[15],同时植物根系泌氧作用在不同光照条件下的差异,可强化好氧、缺氧交替的环境^[16],其根系分泌物亦可补充反硝化过程所需碳源,进而促进生物

脱氮过程^[17]. 植物吸收与微生物代谢在 Ecol-co 系统脱氮过程的相对重要性,可由系统对 TN 的去除速率与进水 TN 质量浓度之间的关系进行推断. 植物对水中营养物质的吸收动力学一般可用 Michaelis-Menten 方程描述^[18-20]. 该方程表明植物对营养盐的吸收速率仅为时间的函数,而与营养盐质量浓度无关. 而以微生物生长代谢为基础的生化反应速率则受基质质量浓度影响,基质质量浓度越高,反应速率越快^[21]. 由图 2 可以看出,种植水生植物的 Ecol-co 系统中, TN 的去除速率与 TN 质量浓度的关系更为符合生化反应动力学特征,由此可得出生物脱氮过程对 TN 的去除起主要作用. 在试验过程中发现, Ecol-co 系统中, NO_3^- -N 质量浓度在处理周期内由 0.14 ~ 0.72 mg/L 提高到 1.11 ~ 7.75 mg/L,高质量浓度条件下提升幅度较大,表明系统内发生了明显的硝化作用(为反硝化作用发生的前提),印证了生物脱氮作用的存在,水生植物应是通过强化系统内生物脱氮作用来促进 TN 的去除效果.

2.2 系统对 TP 去除效果

各试验系统对 TP 的去除效果如图 3 所示. 由图 3 可以看出,与其他两种污染物相比, TP 去除速率相对较快,试验进行的第 3 天,各处理中的 TP 质量浓度均已降至最低水平. 因 2d 为取样的最小间隔, TP 降至最低质量浓度实际所需的时间可能更短. 空白对照组对 TP 的平均去除率仅为 28% ~ 35%. Ecol-co 系统在各进水污染物质量浓度水平下对 TP 均表现出较好的去除效果,其中无植物 Ecol-co 系统对 TP 的平均去除率达到 94% ~ 97%,种植水生植物的 Ecol-co 系统对 TP 的平均去除率为 90% ~ 99%(见图 3(d)). 种植水生植物与否及水生植物的种类,对 TP 的去除效果无显著影响,但其对长期运行的 Ecol-co 系统的 TP 去除效果的影响有待研究.

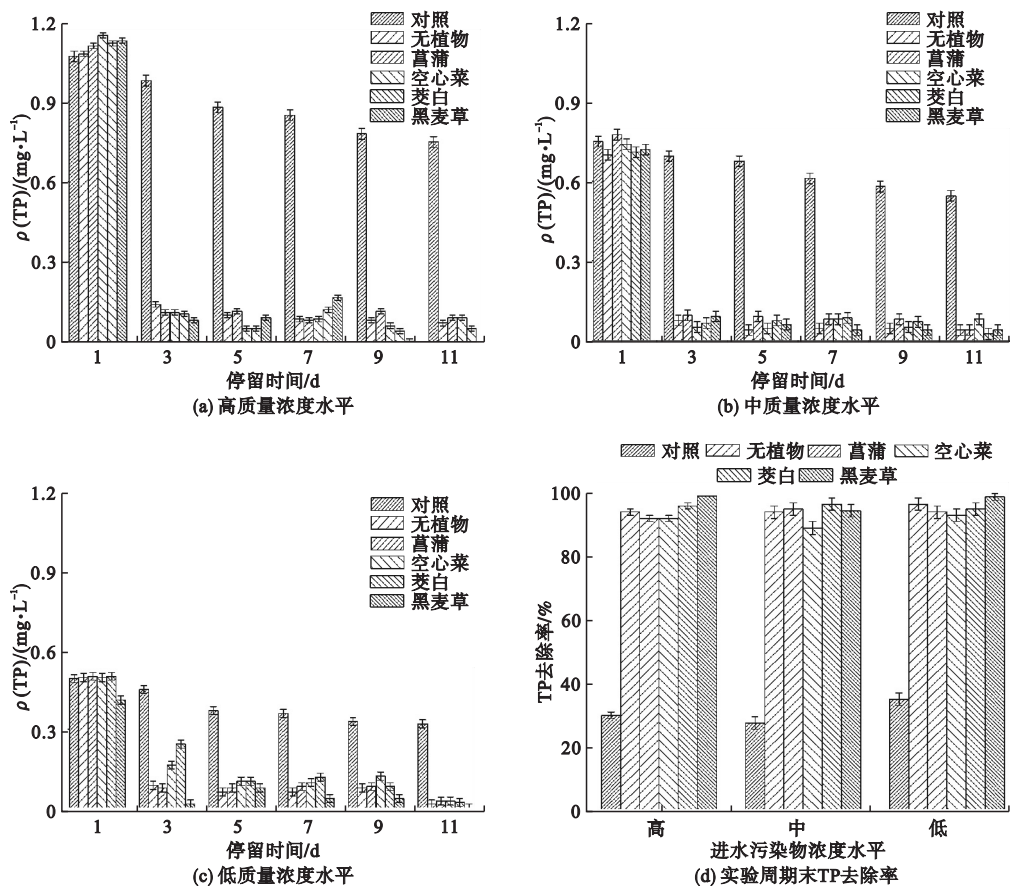


图 3 一个处理周期内各试验系统中的 TP 质量浓度动态变化以及处理周期末 TP 去除率

Fig. 3 Dynamic change of TP mass concentration within one treatment cycle and TP removal rate at the end of the test cycle

对比空白对照组与其他处理的 TP 去除效果可以看出,水中悬浮微生物或藻类的同化作用^[12]对 TP 的去除贡献率较小,填充生态混凝土基质可使 TP 去除率显著提升.多孔生态混凝土表面形成的生物膜^[13],在一定程度上可提高通过生物同化、吸收等途径去除的 TP 量.此外,生态混凝土成分中的硅酸盐水泥在水化的过程中会释放 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,进而使水中磷酸盐以羟基磷酸钙等形式沉淀于多孔生态混凝土表面^[22],这一化学反应过程可能对 TP 的高效去除起到重要作用.农田尾水在沟渠内的停留时间有限,化学除磷反应速率相对较快,是农田尾水中磷酸盐有效去除的重要保障.

尽管本试验中种植水生植物对 TP 的去

除效果未表现出显著的影响,但对于长期运行的 Ecol-co 系统来说,水生植物对恢复生态混凝土的化学除磷容量,维持系统长效的除磷功能可能会起到重要作用.在无外源磷随径流输入沟渠的时段(旱时),植物对水相中残存磷酸盐的不断消耗,可能促使沉积于生态混凝土表面的磷酸盐反向溶解到水相中,进而使生态混凝土的化学除磷容量得到一定程度恢复.

2.3 系统对 COD_{Mn} 去除效能

COD_{Mn} 为地表水环境质量评价的一个重要水质指标,主要反映水中有机的总体含量.考虑非溶解性有机物一般可通过沉积、拦截等物理过程去除,笔者以葡萄糖作为有机质来源着重考察 Ecol-co 系统对溶解性有机

物的去除特性.各处理中,COD_{Mn}均随时间呈明显的下降趋势,在试验进行的第7天到第9天后降至最低水平(见图4).空白对照组对COD_{Mn}的平均去除率为72%,无植物Ecol-co系统对COD_{Mn}的平均去除率提高到78%~92%.种植水生植物对COD_{Mn}去除效果未表现出明显的促进作用(见图4(d)).种植不同植物的Ecol-co系统对COD_{Mn}的去除效果表现出一定差异,总体上种植水菖蒲、

空心菜的试验系统对COD_{Mn}的去除效果较优,各进水污染物质量浓度水平下,COD_{Mn}的平均去除率分别为72%~95%、85%~90%,种植茭白的试验系统对COD_{Mn}的去除效果相对最低,各进水污染物质量浓度水平下,平均去除率为65%~77%.冬季种植黑麦草系统对COD_{Mn}具有较好去除效果,去除率达到73%~85%.

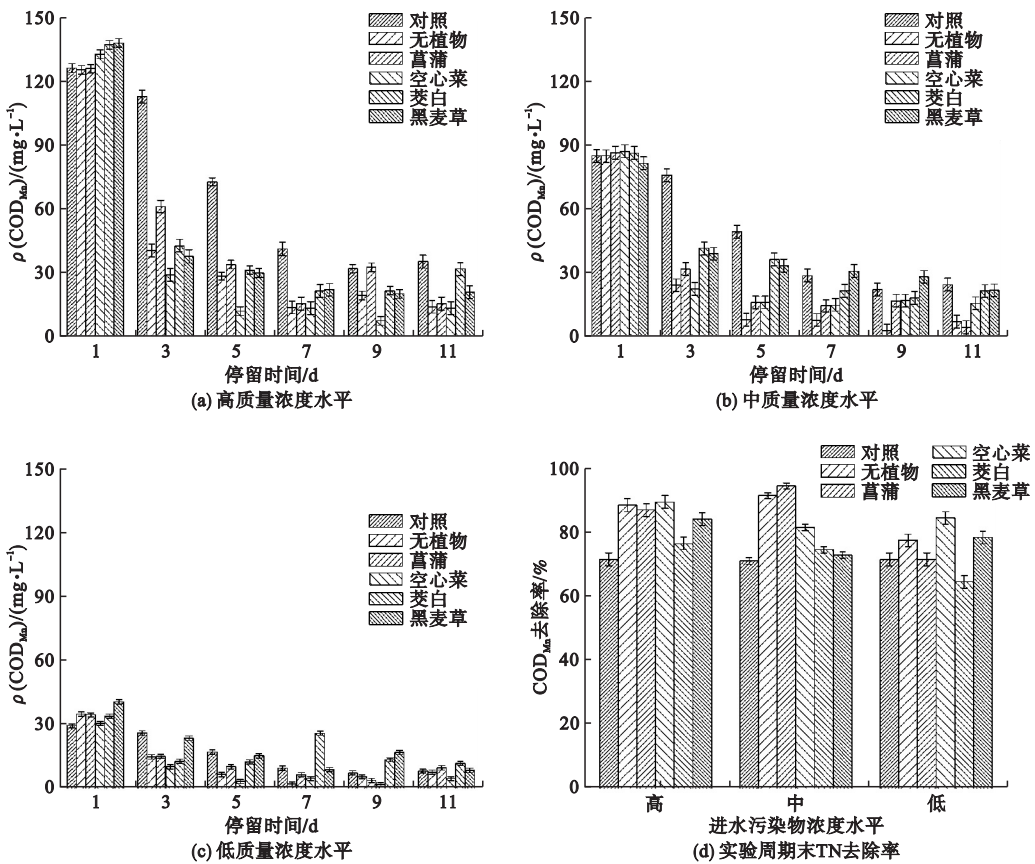


图4 一个处理周期内各试验系统中的COD_{Mn}质量浓度动态变化以及处理周期末COD_{Mn}去除率

Fig. 4 Dynamic change of COD_{Mn} mass concentration within one treatment cycle and COD_{Mn} removal rate at the end of the test cycle

试验配水中采用的葡萄糖在水中容易通过酵解等多种途径去除,使得空白对照条件下即获得了较高COD_{Mn}去除率. Ecol-co系统对COD_{Mn}的去除效果明显高于空白对照组(见图4(d)),仍可解释为该系统内相关功能微生物量的提升^[13]. 种植水生植物可进一步丰富生态系统内的微生物数量、优化微

生物种群结构^[15],进而强化有机物的生物降解作用. 种植水生植物对COD_{Mn}的去除效果并未表现出明显的促进作用,甚至部分种植水生植物的Ecol-co系统对COD_{Mn}的去除率较无植物Ecol-co系统有所降低. 植物根系分泌物的释放可增加水中溶解性有机物的含量^[23],这可能是导致试验结果的一个重要原

因. 种植不同植物的试验系统对 COD_{Mn} 去除效果存在差别, 是由不同植物在根系分泌物、根系泌氧能力以及根际微生物种群结构等方面存在的差异引起的^[17,24-25].

3 结 论

(1) Ecol-co 系统对模拟农田尾水具有较好的处理效能, 夏秋季各植物 Ecol-co 试验系统—水菖蒲、空心菜和茭白对 TN、TP、 COD_{Mn} 的去除率可分别达到 40% ~ 82%、90% ~ 99%、65% ~ 95%, 冬季低温条件下, 种植黑麦草的 Ecol-co 系统对 TN、TP、 COD_{Mn} 的去除率分别为 50% ~ 64%、94.44% ~ 99.9%、73% ~ 85%, 其中 TN、 COD_{Mn} 可在处理周期的第 7 天到第 9 天后降低至最低水平, TP 在处理周期的第 3 天后降低至最低水平.

(2) 填充多孔生态混凝土基质可明显提升污染物的去除效能, 可能归因于微生物在多孔混凝土表面的富集与强化, 同时生态混凝土自身的化学除磷功能应对 TP 的高效去除起到了重要作用.

(3) 与无植物 Ecol-co 系统相比, 种植水生植物的 Ecol-co 系统对 TN 的去除效果有显著提高, 但在 COD_{Mn} 的去除方面并未表现出明显的优势; 种植不同植物的 Ecol-co 系统之间在 TN、 COD_{Mn} 的去除效果上面表现出一定差异, 其中种植水菖蒲、空心菜系统对 TN、 COD_{Mn} 污染物去除率相对较高; 种植水生植物与否及水生植物种类对 TP 去除效果无显著影响.

(4) 对于 Ecol-co 系统, 夏秋季节, 水菖蒲、空心菜为较适宜的水生植物, 黑麦草则适于在冬季种植.

参考文献

[1] 张晓楠, 邱国玉. 化肥对我国水环境安全的影响及过量施用的成因分析[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(4): 104-114.
(ZHANG Xiaonan, QIU Guoyu. Causes of excessive use of chemical fertilizer and its

impacts on China's water environment security [J]. South- to-north water transfers and water science & technology, 2019, 17(4): 104-114.)

- [2] 陆宏鑫, 吕伟娅, 严成银. 生态沟渠植物对农田排水中氮磷的截留与去除效应[J]. 江苏农业学报, 2013, 29(4): 791-795.
(LU Hongxin, Lü Weiya, YAN Chengyin. Interception and removal of nitrogen and phosphorus by ecological ditch plant in agricultural drainage ditch [J]. Jiangsu agricultural journal, 2013, 29(4): 791-795.)
- [3] 王迪, 李红芳, 刘锋, 等. 亚热带农区生态沟渠对农业径流中氮素迁移拦截效应研究[J]. 环境科学, 2016, 37(5): 1717-1723.
(WANG Di, LI Hongfang, LIU Feng, et al. Interception effect of ecological ditch on nitrogen transport in agricultural runoff in subtropical China [J]. Environmental science, 2016, 37(5): 1717-1723.)
- [4] 张树楠, 肖润林, 刘锋, 等. 生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应[J]. 环境科学, 2015, 36(12): 4516-4522.
(ZHANG Shunan, XIAO Runlin, LIU Feng, et al. Interception effect of vegetated drainage ditch on nitrogen and phosphorus from drainage ditches [J]. Environmental science, 2015, 36(12): 4516-4522.)
- [5] 黄晓龙, 于艳新, 丁爱中, 等. 农田尾水污染治理策略研究进展[J]. 中国农村水利水电, 2016(7): 46-50.
(HUANG Xiaolong, YU Yanxin, DING Aizhong, et al. Research on the strategies of the protection and treatment of agricultural tailwater pollution [J]. Water conservancy and hydropower in rural China, 2016(7): 46-50.)
- [6] 陆海明, 孙金华, 邹鹰, 等. 农田排水沟渠的环境效应与生态功能综述[J]. 水科学进展, 2010, 21(5): 719-725.
(LU Haiming, SUN Jinhua, ZOU Ying, et al. Review of environmental impact and ecological function of agricultural drainage ditches [J]. Advances in water science, 2010, 21(5): 719-725.)
- [7] 张燕, 阎百兴, 刘秀奇, 等. 农田排水沟渠系统对磷面源污染的控制[J]. 土壤通报, 2012, 43(3): 745-750.
(ZHANG Yan, YAN Baixing, LIU Xiuqi, et al. Measures for controlling phosphorus from agricultural non-point source pollutions in drainage ditch systems [J]. Chinese journal of soil science, 2012, 43(3): 745-750.)
- [8] 王振旗, 沈根祥, 钱晓雍, 等. 抗侵蚀型生态沟渠构建及其稻田应用效果[J]. 环境工程学报, 2014, 8(9): 4047-4052.
(WANG Zhenqi, SHEN Genxiang, QIAN Xiaoyong, et al. Construction of anti-erosion ecological ditch and its application effect in paddy field [J]. Chinese journal of environmental engineering, 2014, 8(9): 4047-4052.)

- [9] 马秋娟,王宁,吕如兰,等.生态混凝土植生性能研究[J].施工技术,2019,48(21):16-19. (MA Qiujuan, WANG Ning, Lü Rulan, et al. Study on phytoplankton performance of ecological concrete[J]. Construction technology, 2019,48(21):16-19.)
- [10] 刘君实,王杰,全洪珠.再生骨料制备植生型生态混凝土试验研究[J].混凝土,2018,12:129-132. (LIU Junshi, WANG Jie, QUAN Hongzhu. Experimental study on the preparation of vegetative eco-concrete by recycled aggregate [J]. Concrete, 2018,12:129-132.)
- [11] 涂佳敏.生态沟渠处理农田氮磷污水的实验与模拟研究[D].天津:天津大学,2014. (TU Jiamin. Experiment and simulation on nitrogen and phosphorus removal of ecological ditch[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.)
- [12] 李胜男,纪雄辉,朱坚,等.藻类在农业面源污染防治中的应用[J].农业环境科学学报,2019,38(5):970-979. (LI Shengnan, JI Xionghui, ZHU Jian, et al. Utilizing algae for agricultural non-point source pollution control: a review[J]. Journal of agro-environment science, 2019, 38 (5): 970 - 979.)
- [13] 金腊华,陈炜地,袁杰,等.透水混凝土生态膜法处理城市生活污水[J].暨南大学学报:自然科学与医学版,2006,27(1):112-116,140. (JIN Lahua, CHEN Weidi, YUAN Jie, et al. Research on technique of urban sewage treatment with porous concrete eco-films [J]. Journal of jinan university (natural science), 2006,27(1):112-116,140.)
- [14] 金树权,周金波,朱晓丽,等.10种水生植物的氮磷吸收和水质净化能力比较研究[J].农业环境科学学报,2010,29(8):1571-1575. (JIN Shuquan, ZHOU Jinbo, ZHU Xiaoli, et al. Comparison of nitrogen and phosphorus uptake and water purification ability of ten aquatic macrophytes [J]. Journal of agro-environment science, 2010,29(8):1571-1575.)
- [15] 潘傲,张智,孙磊,等.种植不同植物的表面流人工湿地净化效果和微生物群落差异分析[J].环境工程学报,2019,13(8):1918-1929. (PAN Ao, ZHANG Zhi, SUN Lei, et al. Purification effects and microbial community differences of the surface-flow constructed wetlands with different vegetation plantation [J]. Chinese journal of environmental engineering, 2019,13(8):1918-1929.)
- [16] 黄磊,梁银坤,梁岩,等.生物炭添加对湿地植物菖蒲根系通气组织和根系泌氧的影响[J].环境科学,2019,40(3):1280-1286. (HUANG Lei, LIANG Yinkun, LIANG Yan, et al. Influences of biochar application on root aerenchyma and radial oxygen loss of acorus calamus in relation to subsurface flow in a constructed wetland [J]. Environmental science, 2019,40(3):1280-1286.)
- [17] WU H L, WANG X Z, HE X J, et al. Effects of root exudates on denitrifier gene abundance, community structure and activity in a micro-polluted constructed wetland[J]. Science of the total environment, 2017, 598, 697-703.
- [18] 韩璐瑶,吕锡武.水生蔬菜型湿地植物对氮、磷营养盐的吸收动力学[J].环境工程学报,2017,11(5):2828-2835. (HAN Luyao, Lü Xiwu. Absorption kinetics of nitrogen and phosphorus in aquatic vegetable in wetland[J]. Environmental engineering, 2017, 11(5):2828-2835.)
- [19] 陈韬,张本,李剑洋,等.几种生物滞留植物对雨水中营养物的吸收动力学特征[J].环境工程,2018,36(9):21-25. (CHEN Tao, ZHANG Ben, LI Jianfeng, et al. Absorption kinetics of nutrient in stormwater by several bioretention plants [J]. Environmental engineering, 2018,36(9):21-25.)
- [20] 檀香逸,吕锡武,杨子萱,等.不同水培观赏植物对氮素的吸收动力学特性分析[J].水处理技术,2018,44(6):42-45. (TAN Xiangyi, LU Xiwu, YANG Zixuan, et al. Analysis on the kinetic characteristics of nitrogen absorption by different ornamental plants [J]. Technology of water treatment, 2018,44(6):42-45.)
- [21] 山根恒夫.生物反应工程[M].邢新会,译.北京:化学工业出版社,2006. (Yamane Hirof. Bioreactor engineering [M]. Translated by xing Xinhui. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.)
- [22] 李晨,曾丽璇,吕向红.生态混凝土净水技术及其研究现状[J].混凝土,2011(9):125-127. (LI Chen, ZENG Lixuan, Lü Xianghong. Research progress and application of eco-concrete applied to wastewater treatment [J]. Concrete, 2011(9):125-127.)
- [23] 李海燕,陈章和.三种湿地植物的生长及根系溶解性有机碳分泌物研究[J].热带亚热带植物学报,2011,19(6):536-542. (LI Haiyan, CHEN Zhanghe. Growth and dissolved organic carbon exudates from roots of three wetland plants [J]. Journal of tropical and subtropical botany, 2011,19(6):536-542.)
- [24] 陆松柳,胡洪营,孙迎雪,等.3种湿地植物在水培条件下的生长状况及根系分泌物研究[J].环境科学,2009,30(7):1901-1905. (LU Songliu, HU Hongying, SUN Yingxue, et al. Study on the growth characteristics and root exudates of three wetlands plantsat different culture conditions [J]. Environmental science, 2009,30(7):1901-1905.)
- [25] 林剑华,杨扬,李丽,等.8种湿地植物的生长状况及泌氧能力[J].湖泊科学,2015,27(6):1042-1048. (LIN Jianhua, YANG Yang, LI Li, et al. Characteristics of growth and radial oxygen loss of eight wetland plants [J]. Journal of lake sciences, 2015,27(6):1042-1048.)
- (责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)