

# 植物-基质组合对农田退水的净化效果研究

杨金辉<sup>1</sup>, 胡韵爽<sup>1</sup>, 王向余<sup>2</sup>, 李绍飞<sup>1\*</sup>, 刘盼<sup>3</sup>

(1.天津农学院, 天津 300384; 2.唐山工业职业技术学院, 河北 唐山 063020;

3.新安县万荷环保科技有限公司, 河北 保定 071699)

**摘要:**【目的】分析植物-基质组合对农田退水的净化效果。【方法】以独流减河-八排干农田退水为研究对象, 研究植物-基质组合系统中的植物种类和种植密度、基质材料和填充率、水力停留时间(HRT)等技术参数对农田退水净化效果的影响。【结果】植物-基质组合系统(水葱+鸢尾、沸石+火山岩)能够有效净化独流减河-八排干农田退水水质, 形成相对丰度较高的脱氮除磷微生物菌群, 在HRT=3 d的运行模式下, 连续运行10个周期(累计30 d)对氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、总磷(TP)和化学需氧量(COD)的平均去除率分别为95.74%、49.94%、89.03%。【结论】八排干人工湿地建成后, 在植物-基质组合系统中植物、基质、微生物的共同作用下, 出水水质稳定达到地表水Ⅴ类标准, 为华北地区农田退水净化工程建设提供参考。

**关键词:** 植物; 基质; 农田退水; 人工湿地; 微生物

中图分类号: X52; X173

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023410

杨金辉, 胡韵爽, 王向余, 等. 植物-基质组合对农田退水的净化效果研究[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(5): 79-85.

YANG Jinhui, HU Yunshuang, WANG Xiangyu, et al. The efficacy of plants and their growing matrix in improving purification of farmland receding water in constructed wetlands[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(5): 79-85.

## 0 引言

【研究意义】天津市耕地种植作物以小麦、玉米和稻谷为主, 2019年化肥施用量为16.24万t, 汛期面源污染已成为威胁地表水质的主要因素, 控制农业面源污染是改善区域水环境的长效机制。农田退水净化是控制农业面源污染的核心, 分析天津市典型农田退水区的水质污染特点, 研究经济有效的净化技术具有重要的现实意义。【研究进展】日本和美国于20世纪30年代指出了控制面源污染的重要性, 加强了对农业废弃物排放的监管机制, 开发了SWAT、SWMM等面源污染模型<sup>[1-2]</sup>。中国面源污染研究得到了极大重视, 许多研究分析了生物、生态技术对农田退水的净化效果, 并在南方地区建成了人工湿地、生态沟渠、生态塘等农田退水净化工程, 净化效果较好<sup>[3-5]</sup>。【切入点】当前实际应用的农田退水净化技术以植物-基质-微生物的协同作用机制为主, 南方地区建成的生态净化系统普遍取得了较好的治理效果<sup>[6-7]</sup>; 在北方地区, 建设具有稳定净化效

果的生态净化系统还需要开展进一步研究。天津市地处海河流域, 水土资源矛盾突出、地表水污染严重, 农业面源污染是水污染的主要来源, 但目前在该地区开展的农田退水净化技术及应用研究较少。

【拟解决的关键问题】鉴于此, 本研究以天津市静海区内的独流减河-八排干农田退水为研究对象, 分析其水质污染特征, 研究植物-基质组合生态系统的技术参数及净化效果, 为华北地区农田退水净化工程建设提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 农田退水水质指标分析

通过文献调研可知, 我国典型灌区的农田退水污染指标差异较大<sup>[8-9]</sup>, 南方地区农田退水中的TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP浓度和COD浓度均低于北方, 这与南方降水量充沛有关。本研究于2022年9—11月在天津市静海区内独流减河与八排干交汇处的农田退水区开展连续水样监测, 分析NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP和COD的浓度变化。每月取样2次, 每次取样设置3个重复。

### 1.2 水生植物净化试验设计

根据研究区农田退水中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP和COD的浓度范围, 配置试验水体80L, 放入规格为60cm×55cm×36cm的PVC材质试验箱。课题组前期研究表明, 水葱和鸢尾的水体净化效果最佳, 栽种密度越大净化效果越好<sup>[10]</sup>。共设计6个处理和1个

收稿日期: 2023-09-04 修回日期: 2024-01-23

基金项目: 国家科技重大课题专项子课题“城区段河道改善技术研究与示范”(2017ZX07106003-004)

作者简介: 杨金辉(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为农业水土资源与环境。E-mail: www.1271852210@qq.com

通信作者: 李绍飞(1979-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为水生态环境修复。E-mail: lishaofei79@126.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取CC BY-NC-ND协议

对照 (CK), 详见表 1。用蒸馏水洗净供试植物根部, 栽种在试验箱内。试验周期为 15 d, 定期在水面下方 10 cm 处取样, 每个处理取样 3 次, 监测  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 浓度和 COD 浓度变化, 计算去除率。采用 SPSS 27.0 进行显著性分析。试验期间水温介于 22.6~26.9 °C, 溶解氧 (DO) 浓度介于 5~8.5 mg/L。

表 1 水生植物处理

处理	植株数量及类型	种植密度/(株·m <sup>2</sup> )
A1	6 株水葱	18
A2	6 株鸢尾	18
A3	3 株水葱+3 株鸢尾	18
B1	8 株水葱	24
B2	8 株鸢尾	24
B3	4 株水葱+4 株鸢尾	24
CK	0 株水生植物	0

### 1.3 基质净化试验设计

本研究共设置 4 个基质处理, 详见表 2。反应器基质柱为高 80 cm、直径 20 cm 的有机玻璃柱, 底端设有出水口, 基质填充率为 80%, 采用污泥接种法进行基质挂膜试验。活性污泥取自天津静海开发区污水处理厂,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 浓度和 COD 浓度分别在 17.60~20.74、5.23~5.79 mg/L 和 227.00~232.67 mg/L 之间。试验期间维持 DO 浓度在 5~8 mg/L 之间, 每日添加适量营养盐至初始浓度水平, 以维持污泥活性。当水体中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、COD 浓度的去除率分别为 60%、50%并维持稳定时, 表明基质挂膜成功, 此时监测污染物浓度, 计算去除率。

表 2 基质处理

处理	基质类型
C1	8~15 mm 火山岩
C2	15~30 mm 火山岩
D	沸石
E	沸石+8~15 mm 火山岩+15~30 mm 火山岩

### 1.4 植物-基质组合系统的 HRT 选择及微生物群落分析

#### 1.4.1 最佳 HRT 选择试验

HRT 是植物-基质组合系统的重要运行参数<sup>[11]</sup>, HRT 越长净化效果越好, 但达到一定数值后去除率不再增加。反应器采用规格为 148 cm×33 cm×50 cm 的有机玻璃水槽, 加入 80 L 农田退水, 将筛选出的优势基质和植物组合放入反应器, 组成植物-基质组合系统。将 HRT 分别设定为 1、2、3 d, 监测污染物浓度, 对比分析净化效果, 进而选取最佳 HRT。在最佳 HRT 下, 植物-基质组合系统累计运行 30 d, 设置不放植物和基质条件作为对照 (CK), 试验期间水温保持介于 20~25 °C, DO 浓度保持介于 5~9 mg/L。

#### 1.4.2 组合系统的微生物群落组成分析

取植物根系, 用纯水冲洗, 收集水体置于已灭菌的离心管中混匀, 将样本放入保温箱中冷冻, 送至天津诺禾致源公司进行 PCR 扩增子高通量测序, 从门类水平上分析微生物群落组成。

### 1.5 农田退水净化方案设计及应用

#### 1.5.1 研究区域概况

研究区位于天津市静海区团泊镇的独流减河与八排干交汇处, 独流减河是团泊镇内的主要河流, 主要功能是农田蓄水、排涝及养殖取水。八排干起止断面分别为独流减河和青年渠, 全长 10.6 km, 设计流量为 30 m<sup>3</sup>/s, 承担灌溉、排涝功能。八排干沿线分布有大面积稻田, 农田退水及少量养殖废水的排放造成河道水污染。

#### 1.5.2 人工湿地方案设计

人工湿地占地面积为 75 220 m<sup>2</sup>, 采用工艺流程如下: 进水→格栅→进水泵房→预处理池→潜流湿地→生态表面流湿地→自然生态湿地→河道, 具体见图 1。采用上述植物-基质净化试验中得到的技术参数进行潜流湿地和生态表面流湿地的设计。在非灌溉期, 设置泵站由独流减河提水, 维持湿地的生态需水量, 同时, 适当延长水力停留时间, 以达到更好的净化作用。

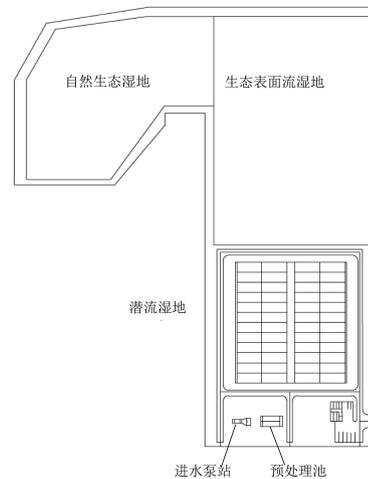


图 1 人工湿地设计

Fig.1 Design of constructed wetland

## 2 结果与分析

### 2.1 研究区水质分析

2022 年 9—11 月研究区农田退水中的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP、COD 浓度见表 3。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度介于 2.16~2.42 mg/L, TP 浓度介于 1.14~1.24 mg/L, COD 浓度介于 45.33~76.50 mg/L, 均超出地表水 V 类水质标准。按水质最不利情况, 将后续试验配水中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 和 COD 浓度分别设置为 3.5、1.5 mg/L 和 70 mg/L。

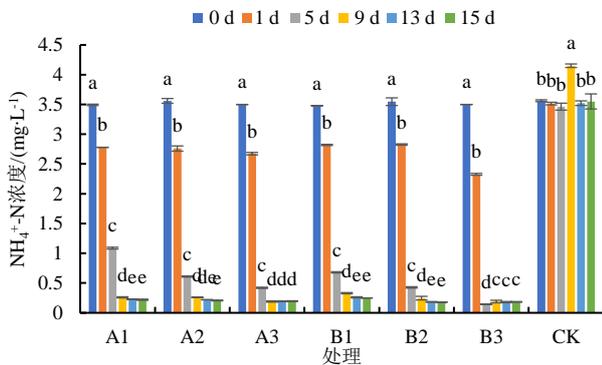
表 3 指标浓度变化规律

Tab.3 The variation of index concentration mg/L

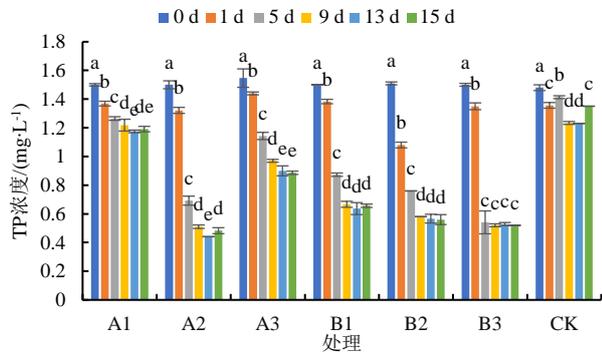
月份	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	TP	COD
9	2.33	1.18	45.33
10	2.16	1.14	55.33
11	2.42	1.24	76.50

2.2 水生植物对农田退水的净化效果分析

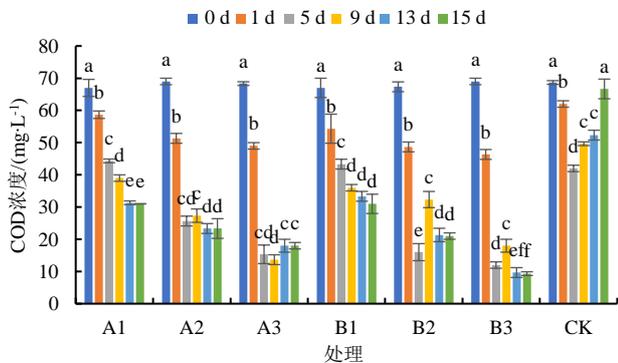
水生植物处理的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP、COD 浓度变化见图 2。供试水生植物对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的净化效果显著。在 13 d 后, 各处理的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度随时间不再显著降低, 净化效果基本稳定。除 CK 外, 各处理 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度均低于 0.26 mg/L, 去除率在 90% 以上。其中, B3 (4 株水葱+4 株鸢尾) 处理去除率最高 (94.86%)。



(a) NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度变化规律



(b) TP 浓度变化规律



(c) COD 浓度变化规律

注 不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 2 不同水生植物处理下农田退水污染物浓度变化

Fig.2 Change of pollutant concentration in farmland backwater treated by different aquatic plants

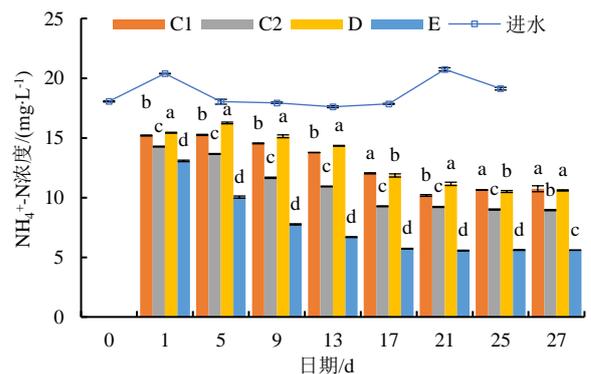
各处理对 TP 的净化效果差异明显。在 13 d 后, 除 A2 处理和 CK 外, 各处理 TP 浓度随时间无显著变化, 净化效果基本稳定。各处理去除率表现为 A2 处理>B3 处理>B2 处理>B1 处理>A3 处理>A1 处理>CK, 分别为 70.63%、64.74%、62.47%、57.56%、41.81%、21.68%、16.81%。A2、B3 处理和 B2 处理去除率均超过 60%, 净化效果较好。

各处理对 COD 的净化效果差异明显。在 13 d 后, 各处理 COD 浓度随时间不再显著降低, 净化效果趋于稳定。各处理去除率表现为 B3 处理>A3 处理>B2 处理>A2 处理>A1 处理>B1 处理>CK, 分别为 85.99%、73.66%、68.32%、66.18%、53.25%、50.25%、23.79%, 均高于 CK。B3 处理下的去除率最高。

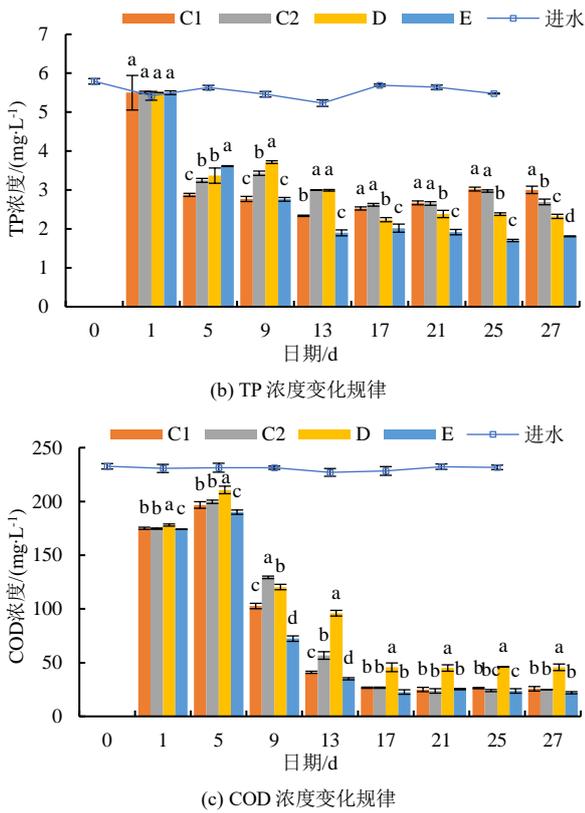
综上, 含鸢尾较多的植物组合处理对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP、COD 的净化效果较好。其中, B3 处理 (4 水葱+4 鸢尾) 净化效果最佳, 因此在后续组合试验中选用 B3 处理下的技术参数。

2.3 不同基质对农田退水的净化效果

不同基质处理的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP、COD 浓度变化见图 3。在相同 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 进水浓度下, C1、C2 处理 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度差异显著, 基质粒径对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除效果影响显著。E 处理 (沸石+8~15 mm 火山岩+15~30 mm 火山岩) 下的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度显著低于 C1、C2、D 处理, 基质组合对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的净化效果显著优于单一基质, 第 17 d 时挂膜成功, 净化效果稳定, 去除率为 67.53%。挂膜成功后, TP 去除率表现为 E 处理>D 处理>C1 处理>C2 处理, 分别为 61.42%、57.25%、51.74%、49.94%, 表明沸石对 TP 的净化效果优于火山岩、组合基质对 TP 的净化效果优于单一基质。挂膜成功后, 含有火山岩的 C1、C2、E 处理中 COD 浓度显著低于 D 处理, 且 3 个处理间没有显著差异, 去除率均达到 90% 左右, 表明火山岩对 COD 的净化效果优于沸石。综上所述, 组合基质的 E 处理 (沸石+8~15 mm 火山岩+15~30 mm 火山岩) 对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP、COD 的净化效果最佳, 在后续组合试验采用 E 处理的技术参数。



(a) NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度变化规律



注 不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 3 不同基质处理下农田退水污染物浓度变化

Fig.3 Change of pollutant concentration in farmland backwater under different substrate treatment

## 2.4 植物-基质组合对农田退水的净化效果分析

### 2.4.1 最佳 HRT 下组合系统的运行效果分析

植物-基质组合系统在  $HRT=1、2、3$  d 运行模式下的  $NH_4^+-N$ 、TP、COD 浓度变化见图 4。在

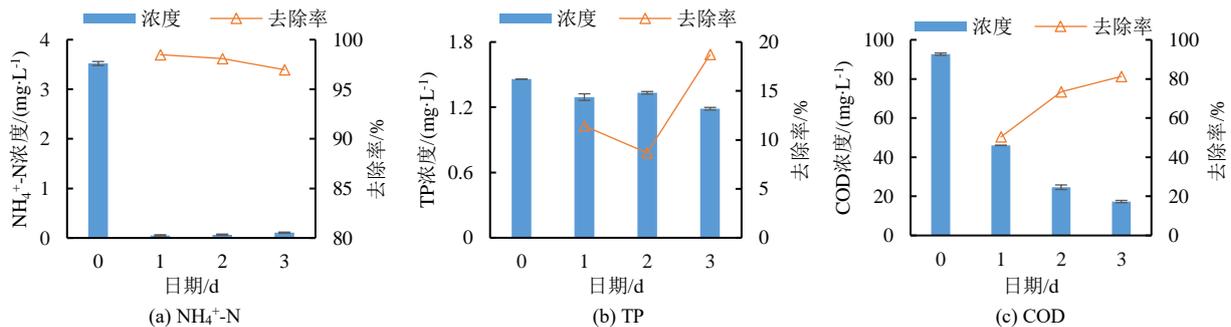
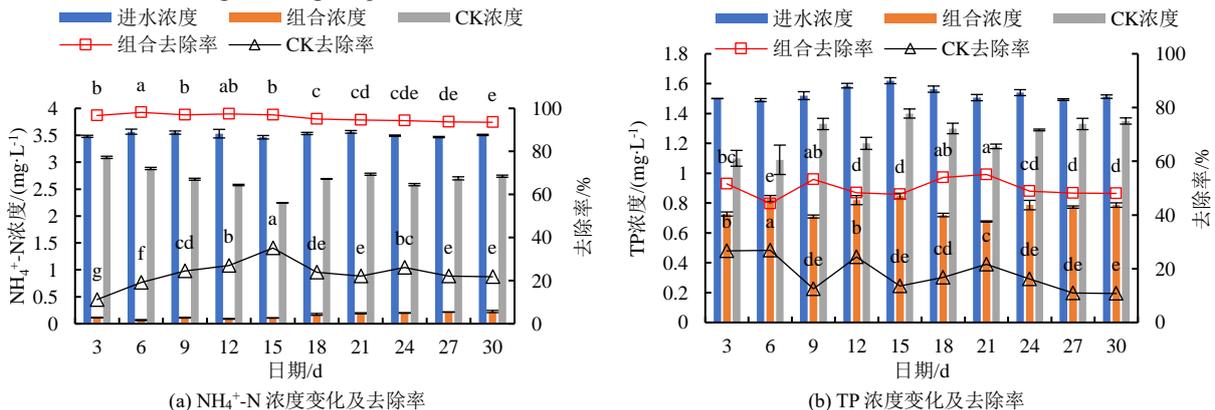


图 4 不同 HRT 下监测指标浓度变化及去除率

Fig.4 Change of pollutant index concentration and removal rate under different HRT



$HRT=3$  d 时, 整体净化效果最佳,  $NH_4^+-N$ 、TP、COD 的去除率分别为 96.97%、18.72%、81.29%, 因此选取的最佳  $HRT$  为 3 d。根据研究区的农田退水污染物浓度, 设置进水  $NH_4^+-N$ 、TP、COD 浓度分别为 3.46~3.57、1.49~1.62、68.33~75.00 mg/L。

植物-基质组合系统连续运行 10 个周期 (30 d) 下的污染物浓度变化规律及去除率见图 5。植物-基质组合系统能够连续稳定地净化研究区农田退水。每个运行周期  $NH_4^+-N$  去除率介于 93.54%~98.13%, 高于 CK 的 11.21%~35.13%, 具有稳定的  $NH_4^+-N$  净化能力。基质表面附着的生物膜可高效解吸基质内部的 N 元素, 达到吸附解吸动态平衡, 生物膜可协同基质、水生植物去除含氮的营养物质。

每个运行周期 TP 去除率介于 44.30%~55.09%, 高于 CK 的 10.79%~26.85%。植物-基质组合系统中植物根部对可溶性活性磷具有吸收、同化作用, 基质表面附着的芽孢杆菌在好氧条件下对 P 具有吸收作用。TP 去除率在 24 d 后有所下降, 去除率维持在 48% 左右, 随着时间延续不再发生显著变化, 这是因为基质在长期运行过程中吸附能力逐渐趋于饱和, 部分 P 元素会重新释放到水体中。

每个运行周期 COD 去除率介于 83.71%~93.72%, 高于 CK 的 37.32%~53.78%。在 21 d 后, COD 去除率介于 86.22%~89.09%, 表明组合系统具有持续较强的 COD 净化能力。生态组合系统中植物的吸收降解、微生物吸收降解共同作用能够去除可溶性有机污染物。

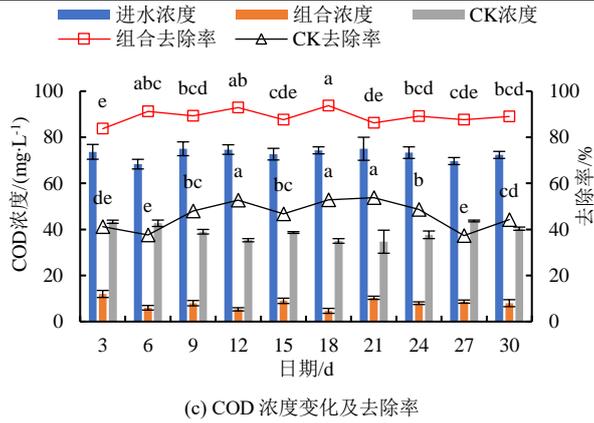


图 5 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP、COD 浓度变化及去除率

Fig.5 The change of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP、COD concentration and removal rate

2.4.2 植物-基质组合系统微生物群落组成分析

门水平上的微生物群落组成和相对丰度见表 4。

植物-基质组合系统中存在丰富的具有净化水体功能的微生物菌群。变形菌门 (*Proteobacteria*) 是门水平最优势的微生物菌群，相对丰度达 58.45%，大多数反硝化微生物属于变形菌门。厚壁菌门 (*Firmicutes*) 是次优势门类，相对丰度达 23.05%，具有反硝化、降解大分子功能，还参与厌氧产甲烷过程，促进水体中 P 元素的降解。拟杆菌门 (*Bacteroidetes*) 能促进碳循环，形成胞外水解酶以降解 COD；还能促进含 N 物质的利用、具有脱氮作用。放线菌门 (*Actinobacteri*)、酸杆菌门 (*Acidobacteria*)、蓝细菌门 (*Cyanobacteria*) 也具有脱氮除磷的作用。

表 4 组合系统中微生物相对丰度及功能

Tab.4 Relative abundance and function of systemic microorganisms

菌群	属性功能	相对丰度/%
<i>Proteobacteria</i>	兼性或专性厌氧；包括大多数亚硝化、硝化、反硝化菌属；脱氮除磷	58.45
<i>Firmicutes</i>	反硝化；降解大分子；参与厌氧产甲烷过程	23.05
<i>Bacteroidetes</i>	专性厌氧；大部分脱氮固氮；部分反硝化	11.53
<i>Actinobacteri</i>	参与氮循环；用于污水处理、石油脱蜡等	2.19
<i>Acidobacteria</i>	脱氮；降解有机质；稳定水体 pH 值	1.01
<i>Cyanobacteria</i>	固氮产氧	0.34

2.5 人工湿地示范工程运行效果分析

八排干农田退水先后经过潜流湿地和生态表面流湿地两个核心净化工艺。潜流湿地占地面积 18 720 m<sup>2</sup>，设有 48 个反应池，采用半地下式结构，水深 1.0 m，基质铺设厚度 0.8 m，填料采用沸石、火山岩组合。根据室内试验，水葱和鸢尾组合净化效果最佳，故采用该组合，考虑到植物的连续生长以及工程造价，栽种密度 10 株/m<sup>2</sup>，共种植 187 200 株。潜

流湿地的纵向坡度约 0.5%，水力停留时间为 3 d，出水自流汇入末端集水渠，进入表面流湿地。表面流湿地占地 56 500 m<sup>2</sup>，包括生态表面流湿地 (37 500 m<sup>2</sup>) 和自然生态湿地 (19 000 m<sup>2</sup>)，有效水深 0.5 m。生态表面流湿地由原有坑塘改造完成，补种植物 80 000 株，形成了植物、动物、微生物的自然生态净化系统，堤岸护坡采用植被生态护岸。出水流入自然生态湿地，利用原有生态坑塘自净能力进一步净化。经过 2023 年 1—6 月连续监测，出水中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP、COD 浓度均已达到地表水 V 类标准。

3 讨论

在北方常见的湿地植物中，鸢尾和水葱的净化效果最佳。虽然选择适宜的植物种类能获得好的净化效果，但除植物种类外，还有一些因素会影响净化效果，如根系发达程度、植物种类多样性、栽种密度。本研究发现，植物根系的发达程度是影响净化效果的重要因素，供试鸢尾长势茁壮，块茎体积大，根系发达，对水体净化效果更好。此外，不同种类植物组合净化效果优于单一植物，这与以往研究结论一致<sup>[12-13]</sup>。在试验条件下，栽种密度越大净化效果越优，但在人工湿地的实际应用中，考虑到工程造价和植物后续的生长空间，所选植物栽种密度稍小于试验组。

本研究发现，沸石对 TP 的去除效果最佳，火山岩对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 COD 的净化效果更好，各类基质对不同污染物的吸附性能不同，沸石+火山岩组合基质 (E 处理) 净化效果优于单一基质，故八排干人工湿地采用了组合基质。肖其亮等<sup>[14]</sup>研究也表明，组合基质的净化效果更佳。*HRT* 是影响人工湿地净化效果的重要运行参数。本研究发现，水质净化效果随着 *HRT* 的增加而提高，特别是 COD 的去除与 *HRT* 存在明显的正向关系；NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除率达到高值后略有下降。郭耀杰等<sup>[15]</sup>和齐冉等<sup>[16]</sup>研究结果也表

明 HRT 与净化效果呈正向关系,但在达到最高值后趋于稳定,后期有所下降,这与本文研究结果一致。

在 3 d 最佳 HRT 条件下连续运行 10 个周期 (30 d) 后,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 和 COD 平均去除率分别为 95.74%、49.94%、89.03%。植物-基质组合系统富含脱氮降解 COD 和除磷功能的微生物菌群,具有优越的去除  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、COD 和 TP 能力。岑璐瑶等<sup>[17]</sup>将菖蒲、风车草、丝带草、美人蕉和芦苇 5 种水生植物分别与基质进行组合构建了人工湿地,对城镇污水处理厂夏季尾水中 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TP 的最优去除率分别为 15.83%、78.11%和 67.30%; Bai 等<sup>[18]</sup>在长春市建立了浮床人工湿地、水平地下流人工湿地、表面流人工湿地的组合型净化工程, COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TP 的去除率分别为 74.79%、80.90%和 78.44%。这些研究采用了与本研究相似的连续式过流的运行方式。上述研究中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 COD 的去除效果劣于本研究,而 TP 去除效果优于本研究。本研究中运行参数更有利于好氧反应、利于  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 COD 去除; TP 的净化效果优于本研究是因为以往研究构建的人工湿地选用的基质中含有石灰岩,增强了对 P 元素的净化效果; Bai 等<sup>[18]</sup>研究中的基质虽然同样为火山岩,但基质层更厚,且采取了下端进水、上端出水的方式,更有利于基质对磷的吸附。

八排干容纳了沿岸农田退水和少量养殖废水,监测期间  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP、COD 浓度分别为 2.16~2.42、1.14~1.24、45.33~76.50 mg/L。人工湿地建于独流减河和八排干交汇处,农田退水净化核心工艺是潜流湿地和生态表面流湿地。在潜流湿地的设计过程中,工艺技术参数采用了本文中植物-基质组合试验的结果,建成后出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP、COD 浓度均能达到地表水 V 类标准。

## 4 结论

1) 在植物筛选中, B3 处理 (4 株水葱+4 株鳊尾) 净化效果最优,在第 13 d 时去除效果达到稳定,对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP、COD 的去除率分别为 94.86%、64.74%、85.99%。

2) 在基质筛选中, E 处理 (沸石+火山岩) 净化效果最优,在第 17 d 时对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 和 COD 的去除率分别为 67.53%、61.42%、90.01%。

3) 植物-基质组合系统的最佳 HRT 为 3 d, 连续运行 10 个周期,对农田退水中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 和 COD 的平均去除率分别为 95.74%、49.94%和 89.03%,并在系统中形成了具有脱氮除磷、降解 COD 功能的种类丰富的微生物菌群。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

## 参考文献:

- [1] 史冲,王浩宇,王慧亮,等.基于 SWAT 的鲇鱼山水库流域氮磷面源污染时空变化研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2023,44(2):39-48.  
SHI Chong, WANG Haoyu, WANG Huiliang, et al. Study on spatio-temporal variation of nitrogen and phosphorus non-point source pollution in Nianyushan reservoir watershed based on swat[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2023, 44(2): 39-48.
- [2] 王慧勇, 遆超普, 王良杰, 等. 基于 SWAT 模型的典型农业小流域氮污染时空分布特征及关键源解析[J]. 湖泊科学, 2022, 34(2): 517-527.  
WANG Huiyong, TI Chaopu, WANG Liangjie, et al. Spatiotemporal distribution characteristics and key sources of nitrogen pollution in a typical agricultural watershed based on SWAT model[J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(2): 517-527.
- [3] 游海林, 吴永明, 刘丽贞, 等. 生态沟渠对农村小流域面源污染物的拦截效应研究[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(4): 130-138.  
YOU Hailin, WU Yongming, LIU Lizhen, et al. Intercepting effect of ecological ditch on non-point source pollution in small rural watersheds[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(4): 130-138.
- [4] 匡义, 陈一新, 徐一琅, 等. 阳陂湖水体生态修复综合技术的研究与实践[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(S2): 310-315.  
KUANG Yi, CHEN Yixin, XU Yilang, et al. Research and practice of Yangbei Lake water ecological restoration technology[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(S2): 310-315.
- [5] 全胜蓝. 长三角区域农田退水污染生态化治理技术及削减效果[J]. 绿色科技, 2022, 24(10): 109-112.
- [6] SUN Y M, TANG K X, SONG H, et al. The effect of domestic sewage treatment on islands using ecological treatment processes: A case study of Haimen Island, Fujian Province[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(23): 15 440.
- [7] 吴迪民, 莫彩芬, 柯杰, 等. 农业面源污染生态拦截系统构建技术研究[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2019, 37(4): 12-18.  
WU Dimin, MO Caifen, KE Jie, et al. Study on the construction technology of the ecological interception system of agricultural non-point source pollution[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science), 2019, 37(4): 12-18.
- [8] 陆阳, 仝炳伟, 王乐, 等. 宁夏引黄灌区典型排水沟道农田退水污染负荷特征分析[J]. 南方农业, 2023, 17(3): 1-7.  
LU Yang, TONG Bingwei, WANG Le, et al. Analysis of pollution load characteristics of typical drainage ditch farmland in the Yellow River irrigation area of Ningxia[J]. South China Agriculture, 2023, 17(3): 1-7.
- [9] 唐丽媛. 北运河上游流域农业面源污染特征及治理措施[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2021.  
TANG Liyuan. Characteristics and control measures of agricultural non-point source pollution in the upper Beiyun River basin[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2021.
- [10] 刘晨阳, 李绍飞, 董立新, 等. 北运河城区段水生植物水质净化效果研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(2): 8-12.  
LIU Chenyang, LI Shaofei, DONG Lixin, et al. Research on water purification effect of aquatic plants in north canal city section[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(2): 8-12.
- [11] 张飞剑, 彭云清, 章茹. 潮汐流人工湿地处理南方农村黑臭水体实验研究[J]. 水处理技术, 2022, 48(4): 114-118, 123.  
ZHANG Feijian, PENG Yunqing, ZHANG Ru. Experimental study on the black and odorous water body in southern rural areas by tidal flow constructed wetland[J]. Technology of Water Treatment, 2022, 48(4): 114-118, 123.
- [12] 刘敏, 吴铁明, 刘蕊, 等. 3 种水生植物的不同组合对富营养水体的净化效果研究[J]. 中国农业科技导报, 2019, 21(7): 155-160.

- LIU Min, WU Tieming, LIU Han, et al. Study on purification of eutrophic water by different combinations of three aquatic plants[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2019, 21(7): 155-160.
- [13] 陈怡, 张乔雨, 郭春兰, 等. 5 种水生植物对富营养化水体净化效果研究[J]. *湖南生态科学学报*, 2023, 10(2): 48-54.
- CHEN Yi, ZHANG Qiaoyu, GUO Chunlan, et al. Study on the purification effect of five aquatic plants on eutrophic water[J]. *Journal of Hunan Ecological Science*, 2023, 10(2): 48-54.
- [14] 肖其亮, 熊丽萍, 彭华, 等. 不同基质组合对氮磷吸附能力的研究[J]. *环境科学研究*, 2022, 35(5): 1 277-1 287.
- XIAO Qiliang, XIONG Liping, PENG Hua, et al. Nitrogen and phosphorus adsorption capacity of different substrate combinations[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(5): 1 277-1 287.
- [15] 郭耀杰, 鲁建江, 董延斌, 等. 水力停留时间对氧化沟处理农村污水的影响[J]. *水处理技术*, 2019, 45(3): 106-110.
- GUO Yaojie, LU Jianjiang, TONG Yanbin, et al. Effect of hydraulic retention time on rural sewage treatment by oxidation ditch[J]. *Technology of Water Treatment*, 2019, 45(3): 106-110.
- [16] 齐冉, 张灵, 杨帆, 等. 水力停留时间对潜流湿地净化效果影响及脱氮途径解析[J]. *环境科学*, 2021, 42(9): 4 296-4 303.
- QI Ran, ZHANG Ling, YANG Fan, et al. Effect of hydraulic residence time on removal efficiency of pollutants in subsurface flow constructed wetlands and analysis of denitrification mechanism[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(9): 4 296-4 303.
- [17] 岑璐瑶, 陈滢, 张进, 等. 种植不同植物的人工湿地深度处理城镇污水处理厂尾水的中试研究[J]. *湖泊科学*, 2019, 31(2): 365-374.
- CEN Luyao, CHEN Ying, ZHANG Jin, et al. Pilot-scale study on advanced treatment of tail water of urban sewage treatment plant by constructed wetlands with different plants[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(2): 365-374.
- [18] BAI Xueyuan, ZHU Xianfang, JIANG Haibo, et al. Purification effect of sequential constructed wetland for the polluted water in urban river[J]. *Water*, 2020, 12(4): 1 054.

## The efficacy of plants and their growing matrix in improving purification of farmland receding water in constructed wetlands

YANG Jinhui<sup>1</sup>, HU Yunshuang<sup>1</sup>, WANG Xiangyu<sup>2</sup>, LI Shaofei<sup>1\*</sup>, LIU Pan<sup>3</sup>

(1. Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China; 2. Tangshan Polytechnic College, Tangshan 063020, China;

3. Xin'an Wanhe Environmental Sci-Tech Co., Ltd, Baoding 071699, China)

**Abstract: 【Objective】** Nonpoint source pollution poses a significant threat to the surface water environment, particularly in agricultural systems. Reconstructed wetlands are an environmentally friendly method to mitigate nonpoint source pollution. This paper investigates the efficacy of plants and their growing medium in removing pollutants from farmland receding water. **【Method】** The experiment was conducted in a subsurface-flow wetland and an ecology surface flow wetland at Bapaigan region along the bank of Duliujian River. We measured the impact of aquatic plant species, planting density, matrix materials and filling rate, and hydraulic retention time of water in the wetland on purification of the water. **【Result】** Among all treatments we compared, the combination of plant species of *Scirpus tabernaemontani*+ *Iris tectorum* and matrix of zeolite+ volcanic rock was most effective to purify the receding water, as they nurtured a microbial community which increased denitrification and dephosphorization. Keeping the hydraulic retention time 3 day and running 10 consecutive cycles can remove ammonia nitrogen, total phosphorus and chemical oxygen demand (COD) contents by 95.74%, 49.94% and 89.03%, respectively. **【Conclusion】** Following the implementation of the Bapaigan constructed wetland, the plants, substrate medium and their associated microbiome were effective to remove the pollutants from the receding water, with the effluent water quality reaching Class V standard for surface water. These findings have important implications for remediating farmland runoff using constructed wetlands in north China.

**Key word:** plant; matrix; farmland receding water; constructed wetland; microorganism

责任编辑: 韩 洋