

不同类型底栖动物对表面流人工湿地系统水质净化的影响

郭颖 谢慧君 张建

EFFECTS OF DIFFERENT BENTHIC FAUNA ON WATER PURIFICATION IN SURFACE FLOW CONSTRUCTED WETLAND SYSTEM

GUO Ying, XIE Hui-Jun, ZHANG Jian

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7541/2022.2022.0145>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同生物促生剂添加量对垂直流人工湿地水质净化效果的影响

THE IMPACT OF DIFFERENT AMOUNT BIOSTIMULANTS SUPPLEMENT ON THE PERFORMANCE OF WATER PURIFICATION IN VERTICAL FLOW CONSTRUCTED WETLAND

水生生物学报. 2019, 43(2): 431–438 <https://doi.org/10.7541/2019.053>

人工湿地-微生物燃料电池耦合系统缓解生物堵塞试验研究

STUDY ON RELIEVING BIO-CLOGGING WITH THE HYBRID SYSTEM OF CONSTRUCTED WETLAND AND MICROBIAL FUEL CELL

水生生物学报. 2021, 45(1): 190–196 <https://doi.org/10.7541/2021.2020.077>

生物浮岛与漂浮植物对开放池塘水质净化效果

PURIFICATION EFFECT OF BIOLOGICAL FLOATING ISLAND AND FLOATING PLANTS ON AN OPEN CONTAMINATED POND

水生生物学报. 2017, 41(6): 1318–1326 <https://doi.org/10.7541/2017.163>

新疆伊犁河不同生境大型底栖动物群落及其影响因素

COMMUNITY STRUCTURE AND ENVIRONMENTAL DETERMINANTS OF MACROINVERTEBRATES IN ILI RIVER

水生生物学报. 2017, 41(5): 1062–1070 <https://doi.org/10.7541/2017.133>

安宁河中游底栖动物群落结构及其与环境因子的关系

MACROINVERTEBRATE COMMUNITY STRUCTURE AND ITS RELATION TO THE ENVIRONMENTAL CONDITIONS IN THE MIDDLE ANNING RIVER

水生生物学报. 2019, 43(3): 643–653 <https://doi.org/10.7541/2019.077>

长江中下游浅水湖群底栖动物资源量宏观格局与预测模型

MACRO-PATTERNS AND PREDICTIVE MODELS OF ZOOBENTHOS ON MID-LOWER YANGTZE SHALLOW LAKES

水生生物学报. 2019, 43(S1): 18–26 <https://doi.org/10.7541/2019.163>



doi: 10.7541/2022.2022.0145

## 不同类型底栖动物对表面流人工湿地系统水质净化的影响

郭颖<sup>1,2</sup> 谢慧君<sup>3</sup> 张建<sup>1,2</sup>

(1. 山东科技大学安全与环境工程学院, 青岛 266590; 2. 山东大学环境科学与工程学院, 青岛 266237;  
3. 山东大学环境研究院, 青岛 266237)

**摘要:** 研究以表面流人工湿地为研究对象, 探讨不同类型底栖动物在夏季和冬季对人工湿地系统氮磷去除效果的影响, 并通过人工湿地系统运行前后不同介质氮磷含量变化及不同介质微生物丰度变化进行水质净化机理分析。结果表明, 夏季添加河蚌和添加田螺均能增强人工湿地系统NO<sub>3</sub>-N和TN去除效果, 其中添加河蚌使得系统NO<sub>3</sub>-N和TN平均去除率较对照组分别提升37.19%和24.32%, 添加田螺使得系统NO<sub>3</sub>-N和TN平均去除率较对照组分别提升22.98%和12.46%。冬季添加摇蚊幼虫使得表面流人工湿地NO<sub>3</sub>-N、TN和TP平均去除率分别在37.8%、54.0%和94.8%, 与对照组相比分别增加了29.51%、15.16%和37.62%, 添加河蚌和田螺受底栖动物半冬眠活动和代谢降低影响没有显著水质提升效果。这表明通过添加底栖动物可以增强表面流人工湿地运行效果, 选取适合的底栖动物种类组合可能在全年提升人工湿地水质净化效果。机理研究结果表明, 底栖动物通过增强底泥和基质中微生物硝化反硝化作用、植物氮吸收和基质氮吸附等促进人工湿地氮去除, 通过增强下层基质磷吸附沉淀和植物磷吸收提升水质磷去除。研究结果将为底栖动物在人工湿地的应用及表面流人工湿地运行效果提升提供理论依据和合理借鉴。

**关键词:** 表面流人工湿地; 底栖动物; 水质净化; 冬季; 氮转化微生物

**中图分类号:** X703      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-3207(2022)10-1501-09



在经济发展、人口增加及水质标准日益严格的背景下, 我国仍然存在污水处理率较低的问题, 尤其农村地区由于污水处理设施不够完善等原因, 污水处理率不足10%<sup>[1]</sup>。除此之外, 我国富营养化问题也依然严重, 2020年生态环境状况公报显示, 在开展营养状态监测的110个湖库中, 轻、中、重度富营养状态的分别占23.6%、4.5%和0.9%<sup>[2]</sup>。面对较为严峻的水污染形势, 人工湿地作为一项投资、运行费用低、景观优美、行之有效的污水处理技术, 一方面能经济高效地解决农村地区污水处理率低的问题, 另一方面也能深度净化城市污水处理厂尾水从而降低排入河湖的氮磷等营养元素含量、防控富营养化<sup>[3, 4]</sup>, 成为我国生态文明建设必不可少的水污染控制举措。

人工湿地通常可以根据水流形态分为表面流人工湿地和潜流人工湿地, 其中表面流人工湿地相

比潜流人工湿地建设和运行成本更低, 能耗小, 管理方便, 但同时氮磷处理率有限, 也面临着冬季湿地植物枯萎及微生物活性降低等造成的冬季处理能力大幅度下降的问题<sup>[5]</sup>。因此, 亟需在维持表面流人工湿地低成本、低能耗等优点的同时提升其氮磷处理效率及冬季处理能力的措施。

人工湿地通过模拟自然湿地生态系统的结构和功能来实现水质净化, 主要依靠基质、植物和微生物等的作用<sup>[6, 7]</sup>。底栖动物作为自然湿地生态系统中的重要一环, 在人工湿地中却少有考虑。实际上, 现有大量研究指出了一些类型的底栖动物在水生生态系统中起到了水质净化作用。Poulsen等<sup>[8]</sup>发现集食型底栖动物摇蚊幼虫可以增加反硝化微生物的活性和多样性并因此促进水生生态系统中的氮去除, 滤食型底栖动物河蚌被证明能去除营养盐及叶绿素 $a$ , 可望建造用于水质澄清的大规模生

收稿日期: 2022-04-12; 修订日期: 2022-07-05

基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07101003); 国家自然科学基金(51578321和51720105013)资助 [Supported by the Major Science and Technology Program for the Water Pollution Control and Treatment (2017ZX07101003), the National Natural Science Foundation of China (51578321 and 51720105013)]

作者简介: 郭颖(1994—), 女, 博士研究生; 主要研究方向为水体生态修复。E-mail: guoying94@126.com

通信作者: 张建(1976—), 男, 教授; E-mail: zhangjian00@sdu.edu.cn

物过滤器<sup>[9]</sup>, Estragnat等<sup>[10]</sup>指出刮食型底栖动物田螺具有降低水体碳氮含量及藻类生物量等作用。同时,绝大多数底栖动物在冬季仍能保持一定的代谢,因此,将底栖动物引入表面流人工湿地可能在维持低成本低能耗的同时提升水质净化效果包括冬季水质净化能力。

目前,有极少量研究尝试将某种底栖动物引入表流人工湿地,获得了一定的水质提升效果<sup>[11, 12]</sup>。但是,对于不同类型底栖动物对表流型人工湿地水质影响效果尤其是冬季处理能力效果尚不清楚。本研究以表面流人工湿地为研究对象,将不同摄食类型底栖动物应用于人工湿地,通过研究夏冬两季不同类型底栖动物对表面流人工湿地系统的水质净化效果,筛选出应用于人工湿地的底栖动物,并分析人工湿地系统中底栖动物的水质净化机理,为后续底栖动物在人工湿地的应用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置

实验装置位于山东省济南市山东大学(北纬36°40', 东经117°03'), 在室外建立了表面流人工湿地装置(Constructed Wetlands, CWs)。装置采用12个50 cm深、43 cm内径的聚乙烯塑料桶。所有实验装置的底部均设有一个排水口,用于排水。装置中心有一根均匀带孔PVC管,用于原位测量温度、pH和溶解氧(DO),装置情况如图1所示。人工湿地基质主要由沉积物、河沙和砾石3部分组成。最上层为5 cm底泥基质层(取自白云湖自然湿地,

北纬36°85', 东经117°37'), 过2 mm筛网去除大颗粒,作为底栖动物栖息地;中间为15 cm厚的河沙基质层(粒径<2 mm; 主要成分为SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>);底部为5 cm厚的砾石层,由粒径在10—15 mm的大块砾石组成。

### 1.2 实验材料

实验植物选择菹草和金鱼藻。金鱼藻和菹草在实际自然环境中互为生态位,在一年中存在自然演替过程。春夏两季金鱼藻发芽生长,秋冬两季菹草存活。菹草和金鱼藻分别于秋季和冬季采集于山东省南四湖(北纬35.29°, 东经116.59°),经去离子水充分洗净,用10%营养盐培养1周后,挑选长势一致的植株种植于实验装置中,种植密度均设置为100株/m<sup>2</sup>。实验动物选择3种不同摄食特性的典型底栖动物用于筛选:集食者摇蚊幼虫、滤食者河蚌和刮食者田螺。其中摇蚊幼虫(*Chironomus riparius*)购于山东省济南市某花鸟鱼虫市场,挑选长度在7—12 mm的摇蚊幼虫,投加密度参考文献中描述的自然界真实密度,为14000条/m<sup>2</sup><sup>[13]</sup>。河蚌采用的具体种类为背瘤丽蚌(*Lamprotula leai*),采集于中国湖北省,长度为(5.4±0.9) cm,重量在(79.5±4.23) g,投加密度参考自然密度,设置为56个/m<sup>2</sup><sup>[14]</sup>。田螺采用的种类为中国圆田螺(*Cipangopaludina chinensis*),采集于中国湖北省,重量在(19.7±1.84) g,投加密度参照自然密度,为100个/m<sup>2</sup><sup>[15]</sup>。3种底栖动物均在室温下曝气培养,并在实验开始前饥饿处理72h。

### 1.3 实验设计

实验中共设计四组实验装置,分别为种植植物并投加摇蚊幼虫的人工湿地系统(CLCWs),种植植物并投加河蚌的人工湿地系统(FMCWs),种植植物并投加田螺的人工湿地系统(VICWs)和只种植植物的对照组(BCWs)。每个组3个平行。其中,植物在春秋和冬夏两季分别种植菹草和金鱼藻。实验设计为序批式运行,通过虹吸法将污水模拟液通入装置。冬季水力停留时间为8d,夏季水力停留时间为6d。冬季共运行8个周期(2017年12月至2018年2月),夏季共运行15个周期(2018年6月至2018年9月),夏季实验在冬季运行结束后的装置上继续进行。污水模拟液浓度参考城市污水处理厂1级B排放标准配置,浓度及配方如表1所示。

### 1.4 检测指标及方法

采集到的水样经过0.45 μm滤膜过滤后,参照《水和废水监测分析方法》<sup>[16]</sup>进行分析。主要分析指标为硝态氮(NO<sub>3</sub>-N)、铵态氮(NH<sub>4</sub>-N)、总氮(TN)和总磷(TP)。其中NH<sub>4</sub>-N采用纳氏试剂光度法,NO<sub>3</sub>-N采用紫外分光光度法,TN采用过硫酸钾

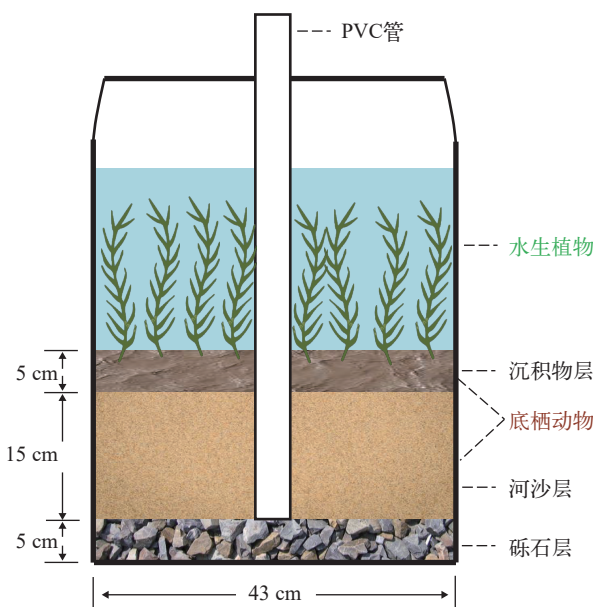


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of constructed wetlands

表 1 污水模拟液浓度及配方

Tab. 1 Wastewater simulation solution concentration and formula

污水指标 Wastewater index	污水浓度 Wastewater concentration (mg/L)	药品化学式 Chemicals	配制浓度 Concentration (mg/L)
NH <sub>4</sub> -N	8.00	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4.39
NO <sub>3</sub> -N	12.00	KNO <sub>3</sub>	10.00
TP	1.00	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	86.66
COD	60.00	C <sub>12</sub> H <sub>12</sub> O <sub>11</sub>	37.75

氧化-紫外分光光度法, TP采用过硫酸钾氧化-钼锑抗分光光度法。

### 1.5 植物、动物及基质检测

考虑到夏季筛选缺少摇蚊幼虫处理组, 采集冬季实验装置运行前后的植物样品、动物样品和基质样品以比较不同底栖动物对人工湿地系统各介质的影响。所有植物经去离子水充分清洗后, 于65℃烘箱干燥72h, 研磨过40目筛备用。所有动物样品经去离子水充分清洗后, 置于冷冻干燥机(德国Unicryo MC 2 L)在-60℃下干燥36h, 研磨过40目筛备用。植物样品中TN和TP经过硫酸-过氧化氢消解后, 通过半微量凯氏定氮法和钼锑抗分光光度法测定<sup>[17]</sup>。动物样品中TN和TP分别利用元素分析仪和电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)测定。为保证基质样品采样的均匀性, 每个装置内的样品在同一高度随机采集5个位置, 最终将其混合均匀。将整个河沙层(共15 cm)分为3个深度: 0—5 cm、5—10 cm和10—15 cm采样。将人工湿地系统中3个平行装置的基质混合, 得到每个条件下不同深度的唯一样品。将沉积物层和河沙层基质样品放在冷冻干燥机中于-60℃下进行干燥, 干燥时间为36h。干燥后的沉积物层和河沙层样品磨碎, 分别过70目和18目筛收集备用。基质样品TN采用半微量凯氏定氮法<sup>[17]</sup>, TP样品经过硫酸-高锰酸钾氧化处理后, 采用钼锑抗分光光度法测定<sup>[17]</sup>。

### 1.6 DNA提取和实时荧光定量PCR反应

在实验结束后, 利用DNA提取试剂盒(Power-Soil<sup>®</sup> DNA Isolation kit DNA, MOBIO)对上层底泥、下层基质和摇蚊幼虫体内DNA进行提取。提取得到的DNA浓度和纯度通过Nanodrops ND-1000进行检测, 合格的DNA样品于-20℃冰箱内保存。实时荧光定量PCR(Real-time fluorescence quantitative PCR, qPCR)在LightCycler<sup>®</sup> 480 II(Roche, USA)仪器上进行, 主要测定氮转化相关功能基因, 包括氨单加氧酶(*amoA*)和亚硝酸盐还原酶(*nirK*和*nirS*)。测定过程采用20 μL反应体系, 包括前引物0.4 μL、后引物0.4 μL、DNA样品2 μL和

SYBR酶10 μL, 其余由Free water补齐。具体操作步骤和引物参见Kang等<sup>[11]</sup>的研究。

### 1.7 数据处理

数据处理采用Microsoft<sup>®</sup> Office Excel 2010软件进行, 利用统计程序SPSS 19.0进行单因素方差分析(ANOVA)来检验结果的显著性, 当 $P < 0.05$ 认为统计学显著。

## 2 结果

### 2.1 不同种类底栖动物表面流人工湿地夏季污染物去除效果

由于夏季摇蚊幼虫发生羽化, 因此夏季装置中选用的底栖动物为河蚌和田螺两种。装置共运行10个周期。人工湿地装置中NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、TN和TP水质指标的去除效果如图2所示。在所有人工湿地装置中, NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、TN和TP去除率为75.7%—94.5%、16.8%—75.6%、69.7%—86.1%和53.3%—99.0%。就NH<sub>4</sub>-N去除效果而言, 添加河蚌、田螺的人工湿地系统及未添加底栖动物的对照组人工湿地系统去除率分别为75.67%—95.24%、74.79%—93.48%和72.01%—94.64%, 3个组别没有明显差异( $P > 0.05$ )。在装置运行过程中, 各人工湿地系统去除效率均相对稳定, 维持在较高水平。在NO<sub>3</sub>-N的去除效果方面, 通过对比两种底栖动物添加的实验组可以看出, 河蚌处理组(去除率在53.82%—77.54%)相较于田螺处理组(去除率在36.31%—60.77%)的处理效果更好( $P < 0.05$ ), 且这两种添加底栖动物的人工湿地系统对NO<sub>3</sub>-N的去除效果均显著高于只添加水生植物的对照组(去除率在16.84%—51.54%;  $P < 0.05$ ), 在整个运行期内NO<sub>3</sub>-N去除效果相对稳定。TN去除效果与NO<sub>3</sub>-N去除效果规律相似, 即去除率总体表现出河蚌组>田螺组>对照组的规律, 3组去除率分别在67.65%—86.08%、52.58%—74.50%和40.79%—67.64%。在3种人工湿地系统中, TP去除率均达70%以上(除第9个周期河蚌组异常点外), 能够满足水质深度净化的要求, 且3种人工湿地系统没有显著差异( $P > 0.05$ )。

### 2.2 不同种类底栖动物表面流人工湿地冬季污染物去除效果

冬季装置选用底栖动物河蚌、田螺和摇蚊共3种, 共运行5个周期。人工湿地装置中NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、TN和TP水质指标的去除效果如图3所示。就NH<sub>4</sub>-N去除效果来看, 除前2个周期添加河蚌的人工湿地系统略高外, 4种人工湿地系统(添加摇蚊幼虫的人工湿地系统、添加河蚌的人工湿地

系统、添加田螺的人工湿地系统和没有添加底栖动物的对照人工湿地系统)均没有明显差异( $P>0.05$ ), 各组去除效率可达83.3%—94.2%, 并且总体上各组

去除效果和夏季相比没有明显差异。不同组别在 $\text{NO}_3\text{-N}$ 去除效果方面则表现出差异, 摇蚊幼虫组 $\text{NO}_3\text{-N}$ 去除率明显高于其他3种湿地系统( $P<0.05$ ),

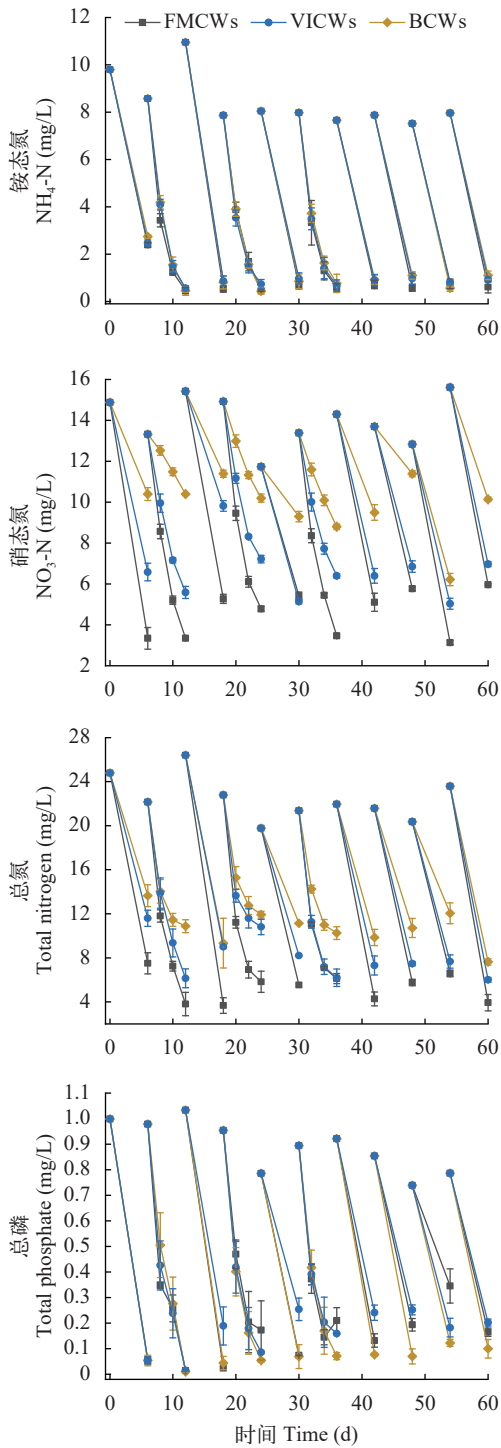


图2 夏季底栖动物人工湿地水质处理效果

Fig. 2 Water quality treatment effect of benthic constructed wetland in summer

FMCWs代表河蚌处理组; VICWs代表田螺处理组; BCWs代表对照组

FMCWs. CWs adding mussels; VICWs. CWs adding viviparidae; BCWs. control group

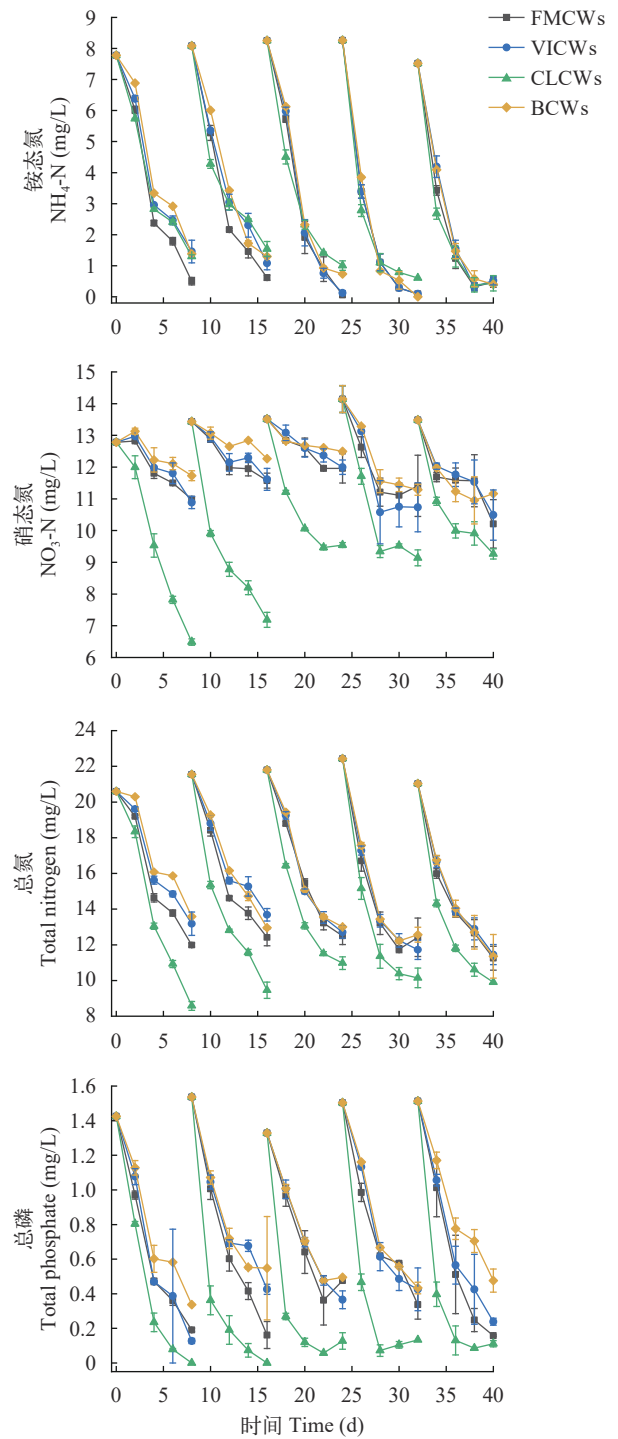


图3 冬季底栖动物人工湿地水质处理效果

Fig. 3 Effect of benthic artificial wetland water quality treatment in winter

FMCWs代表河蚌处理组; VICWs代表田螺处理组; CLCWs代表摇蚊幼虫处理组; BCWs代表对照组

FMCWs: CWs adding mussels; VICWs: CWs adding viviparidae; CLCWs: adding chironomid larvae; BCWs: control group

去除率在29.37%—49.24%, 而河蚌组、田螺组和对照组NO<sub>3</sub>-N去除率分别为11.49%—24.27%、11.21%—24.12%和7.51%—20.20%, 3组之间没有显著差异( $P>0.05$ )。在最后2个周期摇蚊幼虫处理组NO<sub>3</sub>-N去除效果有所降低, 可能与摇蚊幼虫开始羽化有关。TN处理效果和NO<sub>3</sub>-N相似, 摇蚊幼虫组显著优于其他处理组( $P<0.05$ ), 处理率在49.67%—58.36%, 在前两个周期河蚌处理组效果(41.8%—42.4%)略高于田螺组(36.0%—36.5%)和对照组(34.04%—39.88%), 后期3种人工湿地系统间没有明显差异( $P>0.05$ )。这可能与温度进一步降低导致河蚌活动和代谢受限有关。摇蚊幼虫组、河蚌组、田螺组和对照组的总磷去除率分别为90.42%—100%、77.6%—89.6%、71.7%—91.0%和62.73%—76.30%, 可以看出摇蚊幼虫组TP去除效果显著优于其他3种人工湿地系统( $P<0.05$ ), 其他3种人工湿地系统之间没有明显差异( $P>0.05$ )。

### 2.3 不同种类底栖动物添加对表面流人工湿地基质、植物、微生物的作用

为了理解不同种类底栖动物对表面流人工湿地系统带来的影响, 测定了系统运行前后人工湿地系统植物和基质的TN和TP含量, 系统运行前后TN和TP含量变化结果如表2所示。就人工湿地系统运行前后植物TN和TP含量变化来看, 摇蚊幼虫组运行后植物TN含量出现了明显增加, 与运行前相比增加了6.090 mg/g, 河蚌组植物TN含量也略有增加, 增加了1.35 mg/g。田螺组和对照组植物TN含量则分别减少了2.520和3.010 mg/g。植物TP含量变化与TN不同, 4种人工湿地系统均出现了不同程度的增加, 其中以摇蚊幼虫组最为明显(0.794 mg/g), 河蚌组其次(0.297 mg/g), 对照组差异最小(0.040 mg/g)。在基质TN和TP含量变化上, 摇蚊幼虫组变化量也最为显著, 河蚌组TN含量增加了0.087 mg/g, TP变化不显著, 田螺组和对照组表现出相同的TN增加量, 田螺组TP变化量也与对照组差异不大。四组人工湿地系统底泥TN含量均出现了不同程度的降低, 分别降低了0.390、0.291、0.261

和0.272 mg/g, 可以看出摇蚊幼虫组降低得最多, 田螺组最少。底泥TP含量除摇蚊幼虫组没有表现出变化外, 其他3个组TP含量均有所增加, 其中以对照组增加最多, 河蚌组最少, 但3组间差异较小。从表2可以看出, 相比于没有添加底栖动物的对照组人工湿地系统, 添加摇蚊幼虫的人工湿地系统植物中TN和TP含量增加量显著大于对照组, 基质中TN和TP含量增加量同样显著高于对照组, 底泥中TN含量比对照组降低更显著, TP含量增加量显著低于对照组; 添加河蚌的人工湿地系统与摇蚊幼虫组规律相似但是与对照组的差异小于摇蚊幼虫组与对照组的差异, 具体为植物中TN和TP含量增加量显著高于对照组, 基质中TN含量和TP含量增加量略高于对照组, 底泥TN含量比对照组降低更多, TP含量增加量略低于对照组; 而添加田螺的人工湿地系统除植物中TP含量增加量显著高于对照组外, 其余变化均与对照组差异不大。

## 3 讨论

### 3.1 底栖动物添加对表面流人工湿地水质净化效果的影响

在结果2.1中, 3种人工湿地系统NH<sub>4</sub>-N和TP去除效果没有显著差异, NO<sub>3</sub>-N和TN去除效果均呈现河蚌组>田螺组>对照组, 三者NO<sub>3</sub>-N平均去除率分别为67.37%、53.16%和30.18%, TN平均去除率分别为76.12%、64.24%和51.78%。这表明在夏季添加底栖动物能显著提高人工湿地NO<sub>3</sub>-N和TN处理效果, 且添加河蚌处理效果优于添加田螺。在以往的研究里, 研究者通过采取不同的手段提高了人工湿地水质净化效果, 有研究在人工湿地中曝气增氧, 实现了67.41%的TN去除率及69.04%的NH<sub>4</sub>-N去除率<sup>[18]</sup>; 有研究者通过改变人工湿地基质构建生物炭基人工湿地以增强人工湿地脱氮除磷效果, 实现了70%以上的TN、TP去除率<sup>[19]</sup>; 也有研究通过构建潜流—表流复合人工湿地并尝试不同的基质粒径和植物组合, NH<sub>4</sub>-N、TN和TP的总去除率为66.54%—74.05%、61.55%—73.61%和38.16%—

表2 人工湿地系统运行前后不同介质中TN、TP含量变化量

Tab. 2 Variation of TN and TP contents in different media before and after operation of constructed wetland system

项目Item	植物 Plants		下层基质 Lower substrate		上层底泥 Upper sediment	
	TN (mg/g)	TP (mg/g)	TN (mg/g)	TP (mg/g)	TN (mg/g)	TP (mg/g)
摇蚊处理组CLCWs	6.090±0.730	0.794±0.019	0.129±0.002	0.012±0.005	-0.390±0.018	0.000±0.001
河蚌处理组FMCWs	1.350±0.380	0.297±0.024	0.087±0.004	0.007±0.002	-0.291±0.037	0.022±0.001
田螺处理组VICWs	-2.520±0.540	0.267±0.049	0.028±0.001	0.004±0.000	-0.261±0.035	0.026±0.001
对照组BCWs	-3.010±0.770	0.040	0.028±0.009	0.001±0.001	-0.272±0.045	0.030±0.005

54.64%<sup>[20]</sup>。可以看出,本研究实现了和这些研究相似甚至高于这些研究的水质净化效果,同时与曝气、使用吸附材料作为基质等提升表面流人工湿地水质净化效果的手段相比,添加底栖动物提升水质净化效果运行成本更低,管理也更加方便,更适合应用于表面流人工湿地。在夏季人工湿地系统运行期(60d)内,两种底栖动物人工湿地系统水质净化效果都维持稳定,表明通过添加底栖动物能在夏季稳定提升水质净化效果尤其是NO<sub>3</sub>-N和TN处理效果。因此通过添加合适的底栖动物是一种高效且有实际应用意义的表面流人工湿地水质净化效果提升手段。

在结果2.3中,添加了摇蚊幼虫的人工湿地系统在冬季表现出NO<sub>3</sub>-N、TN和TP去除效果的显著增强,添加河蚌的人工湿地系统和添加田螺的人工湿地系统没有表现出明显的冬季水质净化效果的提升,这主要和不同种类底栖动物的习性有关,摇蚊幼虫在冬季具有较高代谢活性<sup>[21]</sup>,对系统基质的扰动也更加强烈,而河蚌和田螺冬季气温降低后通常掘穴进入基质半冬眠,代谢和活动都有所降低<sup>[22]</sup>,对水质影响减小。摇蚊幼虫人工湿地NO<sub>3</sub>-N、TN和TP平均去除率分别为37.8%、54.0%和94.8%,与对照人工湿地平均去除率相比分别增加了29.51%、15.16%和37.62%,较好地解决了表面流人工湿地冬季运行效率低的问题。有文献显示,通过合理植物配置可以在冬季使表面流人工湿地NH<sub>4</sub>-N去除率维持在(62.1±8.8)%, TN去除率在(45.8±15.4)%, TP去除率在(62.1±8.8)%<sup>[23]</sup>;也有研究通过利用地热能构建新型人工湿地实现NH<sub>4</sub>-N和TP的去除率分别为50.45%和69.17%<sup>[24]</sup>; Lu等<sup>[25]</sup>通过添加碳源实现人工湿地NO<sub>3</sub>-N去除率提高到30%。可见与其他技术相比,摇蚊幼虫人工湿地也具有较好的冬季水质净化效果。另一方面,结果2.2中也表现出受摇蚊幼虫羽化影响,摇蚊幼虫处理组在系统运行后期NO<sub>3</sub>-N去除率下降,虽然下降后仍显著高于对照组,但也表现出人工湿地仅添加单一底栖动物可能受底栖动物自身代谢和形态变化等影响。另外,通常底栖动物会通过代谢排泄一定量的NH<sub>4</sub>-N<sup>[26]</sup>,但在本研究中添加底栖动物的处理组与对照组的NH<sub>4</sub>-N去除率均与显著差别,这可能与沉水植物优越的NH<sub>4</sub>-N去除能力避免了底栖动物排泄的NH<sub>4</sub>-N积累有关。

### 3.2 底栖动物型人工湿地水质净化效果增强机理

通常人工湿地氮去除主要依赖基质中微生物的氮转化作用、植物吸收作用和氨挥发作用<sup>[27, 28]</sup>。在结果的2.3部分可以看到,添加摇蚊幼虫和河蚌都

引起了植物中TN含量的增加,这表明将底栖动物引入人工湿地促进了植物对N的吸收作用,这可能是因为底栖动物脱氮产生了一氧化氮,而一氧化氮对植物同化作用有一定的调节功能<sup>[29]</sup>。这种底栖动物对植物TN吸收作用的促进是底栖动物增强人工湿地TN去除的原因之一。一般来说,通过基质中微生物脱氮是人工湿地脱氮的最主要途径<sup>[30]</sup>,硝化微生物在有氧条件下将NH<sub>4</sub>-N转化为NO<sub>3</sub>-N,反硝化微生物再进一步将NO<sub>3</sub>-N还原成氮气等实现水体脱氮是主要机制之一<sup>[31]</sup>。摇蚊幼虫和河蚌等底栖动物可以通过掘穴在人工湿地系统基质形成通道从而形成微好氧区,也通过呼吸作用降低基质局部溶解氧形成微厌氧区<sup>[32]</sup>,从而促进硝化作用及反硝化作用,在保证高NH<sub>4</sub>-N去除率的同时显著提高了系统NO<sub>3</sub>-N去除率。同时,文献表明摇蚊幼虫和河蚌等底栖动物产生的孔穴可以促进NO<sub>3</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N及颗粒性有机质等物质向基质渗透<sup>[32, 33]</sup>,从而促进硝化作用或反硝化作用。针对水质净化效果最突出的摇蚊幼虫人工湿地系统及对照组人工湿地系统做的微生物实验结果表明,添加摇蚊幼虫促进了人工湿地系统上层底泥和下层基质硝化菌和反硝化菌丰度,这验证了摇蚊幼虫等底栖动物对硝氮作用及反硝化作用的促进。此外,研究也显示,摇蚊幼虫、河蚌的肠道内有大量反硝化微生物<sup>[8, 14]</sup>,及河蚌的壳膜有硝化微生物<sup>[14]</sup>,这些微生物能促进在这些特定区域的硝化反硝化反应。在表3中可以看到,摇蚊幼虫的肠道中确实存在大量的氮转化微生物。在本研究中,底栖动物除了表现出对微生物氮转化和植物氮吸收的促进,还表现出对基质氮吸附沉淀等作用的增强。从结果2.3部分可以看到河蚌和摇蚊幼虫也促进了人工湿地上层底泥TN含量的减少和下层基质TN含量的增加,这可能和底栖动物从上层底泥向下层基质运动产生的过水通道有关,也表明了摇蚊幼虫和河蚌等底栖动物增强了

表3 氮转化功能基因在不同介质中丰度

Tab. 3 The copy numbers of nitrogen-transforming functional genes in different media

基因 Gene (copies/ g)	人工湿地系统 Constructed wetland	上层底泥 Upper sediment	下层基质 Lower substrate	摇蚊幼虫体内 <i>Chironomus riparius</i> larvae
<i>nirK</i>	BCWs	8.09±0.12	5.53±0.42	—
	CLCWs	8.14±0.05	6.66±0.93	6.90±0.81
<i>nirS</i>	BCWs	7.54±0.04	4.75±0.89	—
	CLCWs	7.78±0.04	5.68±1.27	6.75±1.19
<i>amoA</i>	BCWs	5.36±0.06	3.99±0.00	—
	CLCWs	5.55±0.02	4.22±0.19	4.51±0.25

人工湿地基质的吸收作用, 这种基质的作用也促进了水中氮的去除。田螺作为刮食者, 主要是在人工湿地底泥表层通过刮食微生物和藻类为生<sup>[15]</sup>, 对植物和下层基质影响有限(表 2), 其本身呼吸作用和体内微生物也能为反硝化提供一定有利条件, 因此田螺表现出了一定的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 去除但效果不突出。

人工湿地除磷机制主要有基质吸附沉淀作用, 植物吸收作用<sup>[34]</sup>, 其中基质的吸附沉淀作用是最主要的<sup>[35]</sup>。2.1 结果中夏季磷去除效果没有显著差异, 2.2 中只有摇蚊添加增强了人工湿地的磷去除, 而表 2 中可以看出摇蚊幼虫促进了下层基质磷含量的增加, 并使得上层底泥磷增量与对照组相比较低, 河蚌和田螺下层基质和上层底泥的磷变化相对对照组不显著。这表明冬季摇蚊幼虫促进了下层基质对磷的吸附沉淀作用, 这可能是由于冬季摇蚊幼虫扰动活动剧烈, 形成的孔穴促进了上覆水反应性活性磷向下层基质的迁移<sup>[36]</sup>, 从而促进基质有机颗粒物和金属离子等对磷的吸附、络合或离子交换<sup>[37]</sup>。而小试实验基质较新可能是使得夏季对照组和底栖动物投加组都实现了较高磷去除率的原因。从表 2 可以看出, 底栖动物可以促进人工湿地植物对磷的吸收。因此底栖动物可能通过促进基质磷吸附沉淀和植物磷吸收增强人工湿地磷去除。

### 3.3 展望

本研究结果显示, 冬季添加摇蚊幼虫显著提高了人工湿地污染物去除效果, 添加河蚌和田螺因河蚌和田螺活动减少代谢降低对人工湿地系统效果无显著提升作用, 等到夏季河蚌和田螺尤其是河蚌对人工湿地运行效果有所提升, 摇蚊幼虫会随气温升高羽化飞离系统, 因此仅添加单一底栖动物可能无法稳定维持人工湿地全年运行效果。通过底栖动物组合比如摇蚊幼虫和河蚌/田螺组合实现全年污染物稳定去除是可行的解决办法之一, 摇蚊幼虫因其极强的繁殖和环境适应能力可在一次引入后每年秋季自然滋生<sup>[38]</sup>, 保证冬季人工湿地具有相当数量摇蚊幼虫<sup>[21]</sup>, 提升冬季人工湿地运行效果, 在摇蚊幼虫春季羽化后, 添加的河蚌和田螺等底栖动物结束半冬眠从而代谢增加, 由此保证人工湿地春夏季运行效果。这意味着未来不同底栖动物组合对人工湿地全年运行效果的提升是一个有待深入研究的方向。在本研究中, 底栖动物投加量是根据自然环境中底栖动物真实密度确定的, 因不同底栖动物个体生物量差异较大, 最终投加生物量也有较大差异, 在这种差异基础上得到了本研究不同种类底栖动物水质净化效果, 然而在未来进行不同底栖动物组合人工湿地水质净化效果研究时, 需要根据

不同底栖动物生态位调整投加量, 以得出最优底栖动物组合净化效果为研究目标, 单种底栖动物净化效果可能与本研究有所差别。另外, 虽然人工湿地系统运行前期底栖动物扰动促进了基质对磷的吸附沉淀作用, 但随着人工湿地基质磷含量的增加, 底栖动物扰动可能会反而造成基质中磷向上覆水中释放, 因此未来底栖动物型人工湿地的多年持续运行效果也有待进一步研究。

## 4 结论

本研究通过在表面流人工湿地中添加不同摄食类型的底栖动物考察了不同类型的底栖动物型人工湿地系统在夏季、冬季的水质净化效果, 并结合人工湿地系统运行前后不同介质氮磷含量变化及不同介质微生物丰度变化揭示了其水质净化机理。结果显示, 夏季 $\text{NO}_3\text{-N}$ 去除效果和TN去除效果均表现为河蚌组(去除率分别为53.82%—77.54%和67.65%—86.08%)>田螺组(36.31%—60.77%和52.58%—74.50%)>对照组(16.84%—51.54%和40.79%—67.64%), 各组 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和TP去除效果没有显著差异。冬季 $\text{NH}_4\text{-N}$ 去除效果各组没有显著差异, 摇蚊幼虫组 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、TN和TP平均去除率与对照组人工湿地相比分别增加了29.51%、15.16%和37.62%, 河蚌组和田螺组受半冬眠活动及代谢减慢影响,  $\text{NO}_3\text{-N}$ 、TN和TP去除率与对照组相比没有显著差异。研究结果表明通过添加合适的底栖动物能在夏季和冬季稳定提升水质净化效果, 底栖动物型人工湿地存在全年运行的可行性。机理研究显示底栖动物通过强化微生物硝化反硝化脱氮、促进植物氮吸收及基质氮吸附等促进人工湿地氮去除, 通过促进下层基质磷吸附沉淀和植物磷吸收强化人工湿地磷去除。

### 参考文献:

- [1] Wang X, Zhang W, Huang Y, et al. Modeling and simulation of point-non-point source effluent trading in Taihu Lake area: perspective of non-point sources control in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2004, 325(1/2/3): 39-50.
- [2] China ecological environment status bulletin 2020 (excerpt) [J]. *Environmental Protection*, 2021, 49(11): 47-68. [生态环境部. 2020年中国生态环境状况公报(摘录) [J]. 环境保护, 2021, 49(11): 47-68.]
- [3] Wu S, Kusch P, Brix H, et al. Development of constructed wetlands in performance intensifications for wastewater treatment: A nitrogen and organic matter targeted review [J]. *Water Research*, 2014(57): 40-55.
- [4] Chen H, Zhang M. Effects of advanced treatment systems on the removal of antibiotic resistance genes in



- wastewater treatment plants from Hangzhou, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(15): 8157-8163.
- [5] Yin X L. Study on long-term performance and enhancement mechanism of constructed wetland with seasonal plants collocation [D]. Jinan: Shandong University, 2016: 15-20. [殷晓乐. 季节性植物搭配强化人工湿地净化污水效果及其作用机制研究 [D]. 济南: 山东大学, 2016: 15-20.]
- [6] Paranychianakis N V, Tsiknia M, Kalogerakis N. Pathways regulating the removal of nitrogen in planted and unplanted subsurface flow constructed wetlands [J]. *Water Research*, 2016(102): 321-329.
- [7] Stottmeister U, Wießner A, Kusch P, et al. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment [J]. *Biotechnology Advances*, 2003, **22**(1/2): 93-117.
- [8] Poulsen M, Kofoed M V W, Larsen L H, et al. *Chironomus plumosus* larvae increase fluxes of denitrification products and diversity of nitrate-reducing bacteria in freshwater sediment [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2014, **37**(1): 51-59.
- [9] Elliott P, Aldridge D C, Moggridge G D. Zebra mussel filtration and its potential uses in industrial water treatment [J]. *Water Research*, 2008, **42**(6/7): 1664-1674.
- [10] Estragnat V, Mermillod-Blondin F, Jully M, et al. Does the efficiency of grazer introduction to restore and preserve the hydraulic performance of infiltration basins depend on the physical and biological characteristics of the infiltration media [J]? *Ecological Engineering*, 2018(116): 127-132.
- [11] Kang Y, Zhang J, Xie H, et al. Enhancement of the performance of constructed wetlands for wastewater treatment in winter: the effect of *Tubifex tubifex* [J]. *RSC Advances*, 2016, **6**(41): 34841-34848.
- [12] Yang X T. Study on nitrogen removal mechanism of constructed wetland system influenced by zoobenthos [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2021. [杨晓彤. 底栖动物影响下的人工湿地系统脱氮机制的研究 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2021.]
- [13] Lagauzère S, Pischedda L, Cuny P, et al. Influence of *Chironomus riparius* (Diptera, Chironomidae) and *Tubifex tubifex* (Annelida, Oligochaeta) on oxygen uptake by sediments. Consequences of uranium contamination [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(4): 1234-1242.
- [14] Kang Y, Xie H, Zhang J, et al. Intensified nutrients removal in constructed wetlands by integrated *Tubifex tubifex* and mussels: performance and mechanisms [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018(162): 446-453.
- [15] Gette-Bouvarot M, Volatier L, Lassabatere L, et al. Ecological engineering approaches to improve hydraulic properties of infiltration basins designed for groundwater recharge [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(16): 9936-9944.
- [16] China EPA. The Monitor And Analysis Method of Water and Wastewater [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 227-285. [国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 227-285.]
- [17] Bao S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 70-270. [鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 70-270.]
- [18] Li S, Wang W D, Qiang Z M, et al. Self-aeration vertical flow constructed wetland for the treatment of rural domestic wastewater [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, **29**(8): 1566-1570. [李松, 王为东, 强志民, 等. 自动增氧型垂直流人工湿地处理农村生活污水试验研究 [J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(8): 1566-1570.]
- [19] Xu X X. Study on purification effect of rural domestic sewage by biochar based constructed wetland [D]. Jinan: University of Jinan, 2021. [徐祥熙. 生物炭基人工湿地农村生活污水净化效果研究 [D]. 济南: 济南大学, 2021.]
- [20] Sun L, Xiang P, Zhang Z, et al. Study on treatment of ultra-low TN-contaminated wastewater by composite constructed wetland with subsurface and surface flow [J]. *Technology of Water Treatment*, 2020, **46**(4): 97-101+105. [孙磊, 向平, 张智, 等. 潜流—表流复合人工湿地处理超低TN含量废水 [J]. 水处理技术, 2020, **46**(4): 97-101+105.]
- [21] Xie Z, Zhang J, Cai K, et al. Temporal and spatial distribution of macrobenthos communities and their responses to environmental factors in Lake Taihu [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(1): 16-22.
- [22] Attard K M, Rodil I F, Glud R N, et al. Seasonal ecosystem metabolism across shallow benthic habitats measured by aquatic eddy covariance [J]. *Limnology and Oceanography Letters*, 2019, **4**(3): 79-86.
- [23] Gao J, Wang W, Guo X, et al. Nutrient removal capability and growth characteristics of *Iris sibirica* in subsurface vertical flow constructed wetlands in winter [J]. *Ecological Engineering*, 2014(70): 351-361.
- [24] Wang Y L. Design of A new constructed wetland using shallow geothermal energy in winter and its effect on wastewater removal [D]. Jinan: University of Jinan, 2021. [王月蕾. 冬季利用浅层地热能的新型人工湿地设计及其对污水的去除效果研究 [D]. 济南: 济南大学, 2021.]
- [25] Lu S, Hu H, Sun Y, et al. Effect of carbon source on the denitrification in constructed wetlands [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(8): 1036-1043.
- [26] Lindenskov R, Jacobsen D. Excretion from the benthic macrofauna covers little of spring nutrient uptake in a small Danish forest stream [J]. *Inland Waters*, 2021, **11**(3): 396-403.
- [27] Tong W J, Zheng W P, Ma L, et al. The impact of different amount biostimulants supplement on the performance of water purification in vertical flow constructed wetland [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, **43**(2): 431-438. [童伟军, 郑文萍, 马琳, 等. 不同生物促生剂添加量对垂

- 直流人工湿地水质净化效果的影响 [J]. *水生生物学报*, 2019, **43**(2): 431-438.]
- [28] Dierberg F E, DeBusk T A, Jackson S D, *et al.* Submerged aquatic vegetation-based treatment wetlands for removing phosphorus from agricultural runoff: response to hydraulic and nutrient loading [J]. *Water Research*, 2002, **36**(6): 1409-1422.
- [29] Mur L A J, Hebelstrup K H, Gupta K J. Striking a balance: does nitrate uptake and metabolism regulate both NO generation and scavenging [J]? *Frontiers in Plant Science*, 2013(4): 288.
- [30] Verhoeven J T A, Meuleman A F M. Wetlands for wastewater treatment: opportunities and limitations [J]. *Ecological Engineering*, 1999, **12**(1/2): 5-12.
- [31] Sirivedhin T, Gray K A. Factors affecting denitrification rates in experimental wetlands: field and laboratory studies [J]. *Ecological Engineering*, 2006, **26**(2): 167-181.
- [32] Shang J, Zhang L, Shi C, *et al.* Influence of Chironomid Larvae on oxygen and nitrogen fluxes across the sediment-water interface (Lake Taihu, China) [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25**(5): 978-985.
- [33] Black E M, Chimententi M S, Just C L. Metagenomic analysis of nitrogen-cycling genes in upper Mississippi river sediment with mussel assemblages [J]. *Microbiology-Open*, 2019, **8**(5): e00739.
- [34] Blanco I, Molle P, Sáenz de Miera L E, *et al.* Basic Oxygen Furnace steel slag aggregates for phosphorus treatment. Evaluation of its potential use as a substrate in constructed wetlands [J]. *Water Research*, 2016(89): 355-365.
- [35] Lu S Y, Jin X C, Yu G. Phosphorus removal mechanism of constructed wetland [J]. *Ecology and Environment*, 2006, **15**(2): 391-396. [卢少勇, 金相灿, 余刚. 人工湿地的磷去除机理 [J]. *生态环境*, 2006, **15**(2): 391-396.]
- [36] Chen M, Ding S, Liu L, *et al.* Iron-coupled inactivation of phosphorus in sediments by macrozoobenthos (chironomid larvae) bioturbation: Evidences from high-resolution dynamic measurements [J]. *Environmental Pollution*, 2015(204): 241-247.
- [37] Xu D, Xu J, Wu J, *et al.* Studies on the phosphorus sorption capacity of substrates used in constructed wetland systems [J]. *Chemosphere*, 2006, **63**(2): 344-352.
- [38] Pinder L C V. Biology of Freshwater Chironomidae [J]. *Annual Review of Entomology*, 1986, **31**(1): 1-23.

## EFFECTS OF DIFFERENT BENTHIC FAUNA ON WATER PURIFICATION IN SURFACE FLOW CONSTRUCTED WETLAND SYSTEM

GUO Ying<sup>1,2</sup>, XIE Hui-Jun<sup>3</sup> and ZHANG Jian<sup>1,2</sup>

(1. College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. School of Environmental Science & Engineering, Shandong University, Qingdao 266237, China; 3. Environmental Research Institute, Shandong University, Qingdao 266237, China)

**Abstract:** In this study, the surface flow constructed wetlands were set up to explore the efficiency of different benthic fauna on nitrogen and phosphorus removal in the constructed wetland system during summer and winter. The water purification mechanism was investigated by the changes of nitrogen and phosphorus contents and microbial abundance in different media before and after the operation period. The results showed that the addition of mussel and viviparidae in summer enhanced the NO<sub>3</sub>-N and TN removal efficiency. Compared with the control group, the average NO<sub>3</sub>-N removal efficiency increased 37.19% and 22.98% by adding mussel and viviparidae, respectively. In addition, the addition of chironomid larvae in winter made the average removal efficiency of NO<sub>3</sub>-N, TN and TP increase by 29.51%, 15.16% and 37.62%, respectively. However, the mussels and viviparidae did not have significant effects due to the semi-hibernation and reduced metabolism of benthic animals in winter. These results indicated that the addition of benthic fauna can enhance the purification effect in surface flow constructed wetland. When suitable combination of benthic fauna was selected, the water purification effect in constructed wetland may be improved throughout the year. The results of mechanism study showed that benthic fauna promoted nitrogen removal by enhancing microbial nitrification and denitrification, plant nitrogen uptake and substrate nitrogen adsorption. The removal of phosphorus was achieved by enhancing substrate phosphorus adsorption and precipitation as well as plant phosphorus uptake. These results could provide a theoretical basis and reasonable reference for the application of benthic fauna in surface flow constructed wetlands.

**Key words:** Surface flow constructed wetland; Benthic fauna; Water purification; Winter; Nitrogen-transforming microorganism