

水芹-绿狐尾藻人工湿地对养殖废水的处理效果

谢 陈^{1,2}, 李 希^{2,①}, 何兴兵^{1,①}, 徐英华^{2,3}, 贾中政⁴, 李裕元^{2,3}, 王 杰⁵, 吴金水^{2,3}

(1. 吉首大学生物资源与环境科学学院, 湖南 吉首 416000;

2. 中国科学院亚热带农业生态研究所 亚热带农业生态过程重点实验室, 湖南 长沙 410125; 3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 河南科技学院, 河南 新乡 453003; 5. 安徽润航农业科技开发有限公司, 安徽 淮南 232100)

摘要: 在安徽淮南构建水芹 [*Oenanthe javanica* (Bl.) DC.] -绿狐尾藻 (*Myriophyllum quitense* Kunth) 人工湿地, 研究人工湿地(水力停留时间 37 d)对猪场养殖废水的处理效果。结果表明:水芹-绿狐尾藻人工湿地对养殖废水中总氮、总磷和化学需氧量的总去除率分别为 96.52%、92.79% 和 65.27%。试验运行 50 d 时人工湿地中总氮、总磷、化学需氧量的出水浓度分别为 1.96、0.14 和 39.60 mg · L⁻¹, 均达到 GB 3838—2002 的 V 类标准, 其中, 总磷出水浓度达到 III 类标准。植物吸收对人工湿地中总氮和总磷的去除贡献率分别为 19.30% ~ 56.32% 和 23.38% ~ 97.10%, 其中, 绿狐尾藻吸收对总氮和总磷的平均去除贡献率分别为 49.84% 和 90.41%, 为人工湿地脱氮除磷的主要途径; 绿狐尾藻湿地中总氮、总磷和化学需氧量的沿程削减模型以指数削减模型为最佳, 公式分别为 $y = (-10.80 + 1.30C_{i0}) e^{(-0.24 - 0.01C_{i0})t}$, $y = (0.97 + 1.33C_{i0}) e^{(-0.23 - 0.09C_{i0})t}$ 和 $y = (23.56 + 0.83C_{i0}) e^{(-0.27 + 0.01C_{i0})t}$ 。采用上述模型对绿狐尾藻湿地总氮、总磷和化学需氧量的出水浓度进行预测, 在水力停留时间为 24 d 时各污染物浓度可达到 GB 8978—1996 的一级标准, 在水力停留时间为 36 d 时各污染物浓度均可达到 GB 3838—2002 的 V 类标准。综上所述, 通过经济湿地(种植水芹)与生态湿地(种植绿狐尾藻)相结合的模式, 完全可以实现对养殖废水的有效处理和达标排放。

关键词: 养殖废水; 水芹; 绿狐尾藻; 人工湿地; 削减模型; 模型预测

中图分类号: Q948.8; X171 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2024)01-0026-09

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2024.01.03

Treatment effect of *Oenanthe javanica*-*Myriophyllum quitense* constructed wetland on swine wastewater XIE Chen^{1,2}, LI Xi^{2,①}, HE Xingbing^{1,①}, XU Yinghua^{2,3}, JIA Zhongzheng⁴, LI Yuyuan^{2,3}, WANG Jie⁵, WU Jinshui^{2,3} (1. College of Biology and Environmental Sciences, Jishou University, Jishou 416000, China; 2. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China; 5. Anhui Runhang Agricultural Science and Technology Development Co., Ltd., Huainan 232100, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2024, 33(1): 26-34

Abstract: *Oenanthe javanica* (Bl.) DC.-*Myriophyllum quitense* Kunth constructed wetland was constructed in Huainan City of Anhui Province, and the treatment effect of the constructed wetland (the hydraulic retention time is 37 d) on swine wastewater from pig farm was studied. The results show that the total removal rates of *O. javanica*-*M. quitense* constructed wetland to total nitrogen, total phosphorus, and chemical oxygen demand in swine wastewater are 96.52%, 92.79%, and 65.27% respectively. The output water concentrations of total nitrogen, total phosphorus, and chemical oxygen demand in the constructed wetland are 1.96, 0.14, and 39.60 mg · L⁻¹ respectively at 50 d of test operation, which all reach the class V standard of GB 3838-2002, in which, the output water concentration of total phosphorus reaches

收稿日期: 2023-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(42077215); 湖南省自然科学基金项目(2021JJ30765)

作者简介: 谢 陈(1995—), 女, 湖南邵阳人, 硕士研究生, 主要从事水生植物生态治理方面的研究。

①通信作者 E-mail: lixi@isa.ac.cn; hexb@jzu.edu.cn

引用格式: 谢 陈, 李 希, 何兴兵, 等. 水芹-绿狐尾藻人工湿地对养殖废水的处理效果[J]. 植物资源与环境学报, 2024, 33(1): 26-34.

the class III standard. The removal contribution rates of plant absorption to total nitrogen and total phosphorus in the constructed wetland are 19.30%–56.32% and 23.38%–97.10% respectively, in which, the average removal contribution rate of *M. quitense* absorption to total nitrogen and total phosphorus are 49.84% and 90.41% respectively, which is the main pathway for nitrogen and phosphorus removal in the constructed wetland; the exponential reduction model is the best reduction model along the way of total nitrogen, total phosphorus, and chemical oxygen demand in *M. quitense* wetland, and the equations are $y = (-10.80 + 1.30C_{i0})e^{(-0.24-0.01C_{i0})t}$, $y = (0.97 + 1.33C_{i0})e^{(-0.23-0.09C_{i0})t}$, and $y = (23.56 + 0.83C_{i0})e^{(-0.27+0.01C_{i0})t}$ respectively. The output water concentrations of total nitrogen, total phosphorus, and chemical oxygen demand in *M. quitense* wetland were predicted by using the above model, the concentration of each pollutant can reach the first level standard of GB 8978–1996 at the hydraulic retention time of 24 d, and reach the class V standard of GB 3838–2002 at the hydraulic retention time of 36 d. In conclusion, it is entirely possible to achieve effective treatment and up-to-standard discharge of swine wastewater through the combination of economic wetland (planting *O. javanica*) and ecological wetland (planting *M. quitense*).

Key words: swine wastewater; *Oenanthe javanica* (Bl.) DC.; *Myriophyllum quitense* Kunth; constructed wetland; reduction model; model prediction

全国污染源普查结果显示:2007年中国畜禽业总氮、总磷和化学需氧量分别占农业排放量的37.9%、56.3%和95.8%,2017年中国畜禽业总氮、总磷和化学需氧量仍分别占农业排放量的56.5%、42.1%和93.8%,表明畜禽养殖污染依然是中国环境污染的主要来源,因此对畜禽业污染排放的高效治理和资源化利用尤为重要^[1]。现今对养殖废水的处理技术大致包括物理化学处理、生物处理和生态处理技术^[2],物理化学处理和生物处理技术占地面积少、处理效率高、处理效果较为稳定,但是普遍存在处理成本高且易造成氮、磷资源浪费及二次污染等问题^[3-4],因此,在目前倡导全面绿色发展的背景下,采用绿色低碳的生态处理技术处理畜禽养殖废水受到广泛关注^[5-6]。生态湿地等生态处理技术具有投资低、生态环境友好等优点,但存在占地面积大、处理效果不稳定、经济效益偏低等不足^[7]。如何进一步提升生态湿地的处理效率和经济效益是目前生态治理的难点。研究结果^[8-10]表明:在人工湿地中种植经济价值较高的水生蔬菜后湿地经济效益显著提高,如种植水芹〔*Oenanthe javanica* (Bl.) DC.〕、豆瓣菜(*Nasturtium officinale* R. Br.)和空心菜(*Ipomoea aquatica* Forssk.)的湿地的每公顷产值分别可达20.00万、3.93万和7.21万元,其中,水芹经济价值最为突出。但大部分蔬菜需要较高的沼液浓度,湿地尾水难以实现达标排放,需要进行深度处理。中国科学院亚热带农业生态研究所研发的绿狐尾藻(*Myriophyllum quitense* Kunth)湿地生态处理技术对于高浓度养殖废

水具有较好的净化效果,对养殖废水中总氮、总磷和化学需氧量去除率均在90%以上^[11-12]。绿狐尾藻是一种多年生沉水或浮水草本植物,不仅对高氮、高磷具有较强的耐受性,而且可作为优质畜禽肥料进行产业化开发利用,为养殖废水治理的优选植物^[13-14]。因此,将水生蔬菜种植与绿狐尾藻湿地生态处理技术有机结合,在提升湿地经济效益的同时,实现养殖废水的达标排放,值得进一步深入探索。

表面流人工湿地是指最为接近自然湿地,水流在湿地表面呈推流式前进的人工湿地,由于基建维护成本较低,不易造成堵塞,处理效果较好,已在农村地区大力推广^[15]。目前,学者对多级串联垂直流人工湿地及多级串联表面流人工湿地修复河流等污染水体开展了系列研究^[16-18],但是串联不同种类植物多级表面流人工湿地对养殖废水的处理效果尚不明确。

基于此,本研究在安徽润航农业科技开发有限公司循环农业基地开展野外试验,选取水芹和绿狐尾藻2种植物构建多级表面流人工湿地,在沼液高值化利用(水芹种植)条件下,利用绿狐尾藻湿地对水芹种植尾水进行处理,探究人工湿地对不同进水浓度养殖废水的处理效果及沿程变化情况,并根据绿狐尾藻湿地污染物进水浓度预测后续沿程的浓度变化,以期为畜禽养殖废水的治理提供科学依据和技术支撑。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

试验区位于安徽省淮南市凤台县凤凰镇岗胡村

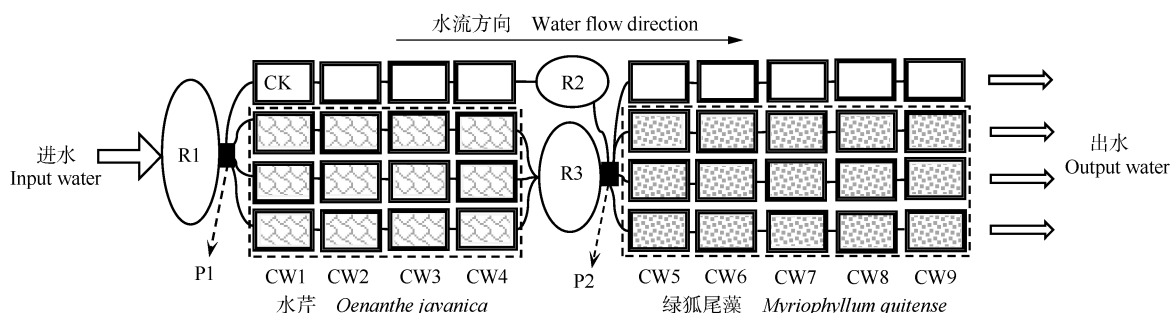
的安徽润航农业科技开发有限公司循环农业基地(东经116°43′、北纬32°45′),该区域位于淮河中游、淮北平原南缘,境内地下水源丰富,地表径流密布,大部分区域海拔在25 m以下,属于亚热带季风气候区,四季分明,雨热同期,气候温和湿润,年均降水量800~1 000 mm,无霜期216 d,年平均气温15.1℃。近年来该地区规模养殖发展迅速,生猪和家禽规模养殖占比分别达60%和85%以上,排放的养殖废水对当地水体造成了重大威胁。

本研究的养殖废水来自附近一大型种猪场,猪场总占地面积68 000 m²,猪场采用尿泡粪收集模式,粪污水产生量约为200 t·d⁻¹,经固液分离后进入黑膜沼气池进行厌氧发酵处理,输出沼液(养殖废水)主要用于周边农田施肥和该公司的水芹种植。试验期内所用养殖废水中总氮、总磷和化学需氧量的平均浓度分别为178.30、18.30和302.00 mg·L⁻¹。

1.2 试验设计

针对沼液高值化利用和达标排放要求,本试验主

要研究沼液高值化利用(水芹种植)以及绿狐尾藻湿地生态处理技术的处理效果与过程机理。湿地系统(图1)设置在野外,由调节池和9级表面流人工湿地串联组成,前端(CW1级至CW4级)种植当地有重要经济价值的水芹(株高约20 cm),后端(CW5级至CW9级)种植净化污水的水生植物绿狐尾藻(株高约20 cm),设置植物处理3组(即3个重复)和1组无植物对照组。调节池1储存养殖废水,调节池2储存对照组湿地出水,调节池3储存水芹湿地出水,用蠕动泵控制进水流速(水芹湿地流速1 428.57 mL·h⁻¹,绿狐尾藻湿地流速416.66 mL·h⁻¹)。各级湿地单元表面积0.24 m²(长0.4 m、宽0.6 m),深30 cm(湿地水深25 cm),均采用管道进水,每级装置进水口离装置底部5 cm,出水口离装置底部20 cm。植物种苗的初始投放生物量为2 kg·m⁻²。9级表面流人工湿地总的水力停留时间为37 d,其中前4级设置为7 d,后5级设置为30 d。试验时间为2021年6月22日至8月20日,试验周期为60 d。



R1, R2, R3: 分别表示调节池1、2和3 Representing regulating pool 1, 2, and 3 respectively; P1, P2: 分别表示蠕动泵1和2 Representing peristaltic pump 1 and 2 respectively; CK: 对照组 The control group.

图1 水芹-绿狐尾藻人工湿地(CW)平面示意图

Fig. 1 Plan schematic diagram of *Oenanthe javanica*-*Myriophyllum quitense* constructed wetland (CW)

1.3 样品采集和测定

1.3.1 水样采集和测定 试验开始后,每5 d采集1次水样,在各级湿地出水口及中心分别取样约25 mL,混合后(共50 mL)作为每级污染物出水浓度的待测样品,同时采集调节池1内原液50 mL作为污染物进水浓度的待测样品,每次采集37个样品,共采集12批水样,分别测定总氮、总磷和化学需氧量浓度。采用HJ 636—2012中的碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定总氮浓度,采用GB 11893—1989中的钼酸铵分光光度法测定总磷浓度,采用HJ 828—2017中重铬酸盐法测定化学需氧量浓度。

1.3.2 植物样品采集和测定 分别于试验运行0、30和60 d用百分之一分析天平称量各级湿地的植物鲜质量,其中,由于绿狐尾藻生物量大,运行30 d时收割1次后重新投放,投放生物量为2 kg·m⁻²;同时采集各级湿地中心面积10 cm×10 cm样方内新鲜植物,称量后于105℃烘箱中烘干至恒质量,计算含水率后换算成各级湿地的植物干质量,每次采集27个植物样品,共采集3批植物样品,分别测定植物总氮和总磷含量。采用硫酸+过氧化氢凯氏法消煮,并采用过硫酸钾氧化吸光光度法测定总氮含量^[19];采用钼锑抗比色法测定总磷含量^[20]。

1.4 数据处理和分析

人工湿地中污染物(总氮、总磷和化学需氧量)去除率(R)的计算公式为 $R = [(C_{i0} - C_i) / C_{i0}] \times 100\%$; 式中, C_{i0} 为第 i 次采样各污染物的进水浓度, C_i 为第 i 次采样各污染物的出水浓度。人工湿地中单级污染物去除率(S)的计算公式为 $S = [(C_{x0} - C_x) / C_0] \times 100\%$; 式中, C_{x0} 为第 X 级湿地各污染物的进水浓度, C_x 为第 X 级湿地各污染物的出水浓度, C_0 为各污染物进水浓度的平均值。植物总氮(总磷)吸收量(A_p)的计算公式为 $A_p = B_p \times C_p$; 式中, B_p 为各级湿地的植物生物量(以干质量计), C_p 为植物总氮(总磷)含量。植物含水率(L)的计算公式为 $L = [(m_1 - m_2) / m_1] \times 100\%$; 式中, m_1 为植物鲜质量, m_2 为植物干质量。水体总氮(总磷)去除量(C_i)的计算公式为 $C_i = (C_{x0} - C_x) \times \text{进水总量}$; 植物吸收对湿地总氮(总磷)的去除贡献率(R_i)的计算公式为 $R_i = (A_p / C_i) \times 100\%$ 。

使用 Microsoft EXCEL 2019 软件进行数据分析, 使用 Origin 2021b 软件进行绘图, 使用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析和相对均方根误差(RRMSE)分析, 处理组各指标均用 3 个重复的平均值表示。在测定的 12 组水样数据中, 根据测定结果选取 8 组数据使用 SPSS 22.0 软件对绿狐尾藻湿地中各污染物浓度变化进行曲线拟合, 根据浓度变化趋势初步选择的曲线类型包括指数、线性和二次多项式拟合。各拟合曲线通用公式分别为 $y = a \cdot e^{bt}$ 、 $y = at^2 + bt + c$ 和 $y = at + b$; 式中, y 为湿地出水污染物浓度, t 为水力停留时间, a 、 b 、 c 为曲线系数。

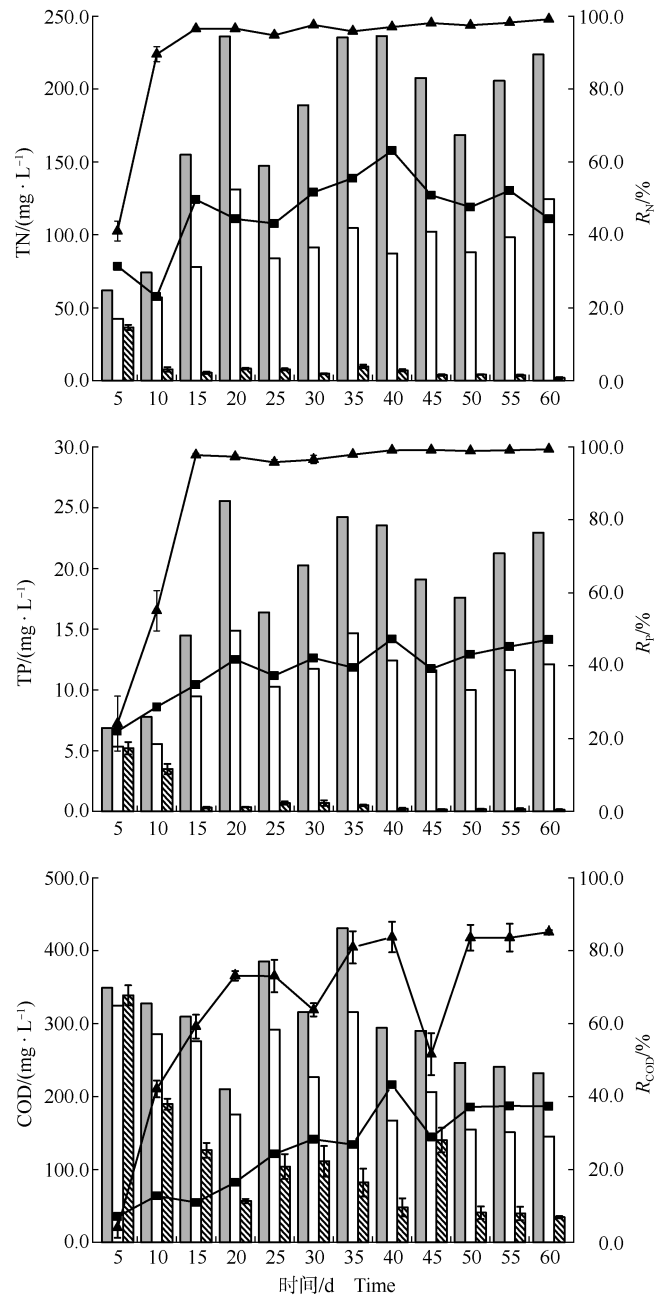
根据 8 组数据中各污染物进水浓度(C_{i0})和对应拟合曲线的系数, 使用 SPSS 22.0 软件对其进行一元回归分析, 得到出水污染物浓度(y)与水力停留时间(t)之间的沿程削减模型。

将另外 4 组数据中的 3 组(由于试验刚进行的数据无代表性, 故第 5 天的数据不进行验证)分别带入沿程削减模型, 得到对应的拟合曲线方程。根据相关性分析结果和相对均方根误差对其进行检验, 得到最佳沿程削减模型。

2 结果和分析

2.1 人工湿地中污染物浓度变化及去除率

连续 60 d 的水质监测结果(图 2)表明: 总体上看, 水芹-绿狐尾藻人工湿地中各污染物(总氮、总磷



■: 污染物进水浓度 Input water concentration of pollutant; □: 对照组污染物出水浓度 Output water concentration of pollutant of the control group; ▨: 处理组污染物出水浓度 Output water concentration of pollutant of the treatment group; —■—: 对照组污染物去除率 Removal rate of pollutant of the control group; —▲—: 处理组污染物去除率 Removal rate of pollutant of the treatment group.

TN: 总氮浓度 Total nitrogen concentration; TP: 总磷浓度 Total phosphorus concentration; COD: 化学需氧量浓度 Chemical oxygen demand concentration. R_N : 总氮去除率 Removal rate of total nitrogen; R_P : 总磷去除率 Removal rate of total phosphorus; R_{COD} : 化学需氧量去除率 Removal rate of chemical oxygen demand.

图 2 水芹-绿狐尾藻人工湿地污染物进、出水浓度及去除率的变化
Fig. 2 Changes of input and output water concentrations and removal rates of pollutant in *Oenanthe javanica*-*Myriophyllum quitense* constructed wetland

和化学需氧量)浓度均随时间推移而降低,其中试验前期(0~15 d)下降较为明显,运行 20 d 后处理效果基本趋于稳定。运行 50 d 时人工湿地中总氮、总磷、化学需氧量的出水浓度分别为 1.96、0.14 和 39.60 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,均已明显优于《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001)(总氮以氨氮计,氨氮浓度小于或等于 80 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$;总磷和化学需氧量浓度分别小于或等于 8 和 400 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$),可达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) V 类标准(总氮、总磷和化学需氧量浓度分别小于或等于 2、0.4 和 40 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$),其中总磷浓度达到 III 类标准(小于或等于 0.2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。

结果(表 1)显示:水芹-绿狐尾藻人工湿地(CW)对养殖废水污染物的去除率均较高,总氮、总磷和化学需氧量的总去除率分别为 96.52%、92.79% 和 65.27%,远高于对照组。其中以 CW5 级对 3 种污染物的去除率最高,对总氮、总磷和化学需氧量的去除率分别达到 39.72%、38.32% 和 23.30%,CW6 级至 CW9 级对 3 种污染物的去除率逐渐降低并趋于稳定。

2.2 人工湿地中植物的总氮、总磷吸收特征及去除贡献率

水芹-绿狐尾藻人工湿地(CW)中植物的总氮、总磷吸收特征及去除贡献率见表 2。结果显示:水芹湿地中 CW4 级的植物生物量(0.35 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)显著($P < 0.05$)高于其他 3 级,绿狐尾藻湿地植物生物量

表 1 水芹-绿狐尾藻人工湿地(CW)污染物去除率¹⁾
Table 1 Removal rates of pollutants in *Oenanthe javanica*-*Myriophyllum quitense* constructed wetland (CW)¹⁾

湿地等级 Wetland grade	$R_N/\%$		$R_P/\%$		$R_{\text{COD}}/\%$	
	CK	T	CK	T	CK	T
CW1	3.21	10.41	3.66	9.11	2.58	7.34
CW2	4.37	10.00	3.42	10.17	3.18	7.85
CW3	4.76	9.59	3.91	10.47	2.86	6.75
CW4	5.23	12.11	3.16	12.57	2.56	8.50
CW5	5.89	39.72	5.24	38.32	2.77	23.30
CW6	6.24	10.92	6.15	9.50	3.62	3.31
CW7	5.78	1.47	5.08	2.56	2.26	2.57
CW8	6.31	1.04	4.87	0.06	2.71	1.67
CW9	6.61	0.26	4.51	0.03	3.26	1.98
总计 Total	48.40	96.52	40.00	92.79	25.80	65.27

¹⁾ R_N : 总氮去除率 Removal rate of total nitrogen; R_P : 总磷去除率 Removal rate of total phosphorus; R_{COD} : 化学需氧量去除率 Removal rate of chemical oxygen demand. CK: 对照组 The control group; T: 处理组 The treatment group.

从 CW5 级至 CW9 级逐级递减。植物总氮含量在水芹和绿狐尾藻湿地中均呈逐级降低的趋势,其中,水芹的总氮含量为 38.50~42.12 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,绿狐尾藻的总氮含量为 10.02~24.62 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。植物总氮吸收量(46.90 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)和水体总氮去除量(95.60 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)均以 CW5 级最高。各级湿地中植物吸收对湿地总氮的去除贡献率为 19.30%~56.32%,其中,绿狐尾藻湿地的去除贡献率较高(45.09%~56.32%)。

结果(表 2)还显示:植物总磷含量在水芹湿地中呈逐级增加的趋势,而在绿狐尾藻湿地中呈逐级降低

表 2 水芹-绿狐尾藻人工湿地(CW)中植物的总氮、总磷吸收特征及去除贡献率($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 2 Absorption characteristics and removal contribution rates of total nitrogen and total phosphorus of plants in *Oenanthe javanica*-*Myriophyllum quitense* constructed wetland (CW) ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

湿地分级 Wetland grade	$B_p/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$	总氮吸收特征和去除贡献率 Absorption characteristics and removal contribution rate of total nitrogen				总磷吸收特征和去除贡献率 Absorption characteristics and removal contribution rate of total phosphorus			
		$C_p/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	$A_p/(\text{g} \cdot \text{m}^{-2})$	$C_t/(\text{g} \cdot \text{m}^{-2})$	$R_t/\%$	$C_p/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	$A_p/(\text{g} \cdot \text{m}^{-2})$	$C_t/(\text{g} \cdot \text{m}^{-2})$	$R_t/\%$
CW1	0.15±0.03b	42.12±7.52a	5.66±0.82b	25.90±1.24b	21.92±1.51a	6.34±0.24b	1.41±0.20b	3.54±0.13d	39.80±7.20a
CW2	0.13±0.02b	41.58±5.93a	5.16±0.79b	26.60±3.20b	19.30±3.71b	6.42±0.18ab	1.33±0.11b	4.54±0.15c	29.31±6.11b
CW3	0.13±0.04b	41.31±6.74a	5.21±0.97b	26.80±3.42b	19.43±2.74b	6.94±0.23a	1.50±0.04b	6.41±0.42b	23.38±1.42b
CW4	0.35±0.12a	38.50±4.83a	11.60±2.81a	48.30±3.00a	24.02±1.93a	7.01±0.56a	3.83±0.12a	7.75±0.44a	49.39±2.81a
CW5	2.75±0.01a	24.62±4.65a	46.90±0.75a	95.60±5.14a	49.11±3.02b	3.37±0.37a	13.00±0.41a	14.70±0.72a	88.40±8.72b
CW6	2.48±0.12b	11.64±1.69b	5.16±0.36b	9.16±3.61b	56.32±2.70a	2.22±0.41b	4.58±0.27b	6.08±0.21b	75.34±3.90bc
CW7	2.23±0.11c	10.58±1.52b	3.04±0.28c	6.50±0.82b	46.70±5.94b	1.91±0.14c	0.96±0.08c	1.00±0.03c	96.01±3.51a
CW8	2.21±0.08c	10.19±1.27b	2.66±0.30d	5.12±0.44b	52.00±4.62ab	1.81±0.08c	0.60±0.04c	0.63±0.02c	95.21±2.45a
CW9	2.02±0.13d	10.02±0.57b	1.71±0.36d	3.79±0.48b	45.09±1.91b	1.75±0.10c	0.34±0.08c	0.35±0.01c	97.10±5.83a

¹⁾ B_p : 植物生物量 Plant biomass; C_p : 植物总氮(总磷)含量 Total nitrogen (total phosphorus) content in plants; A_p : 植物总氮(总磷)吸收量 Amount of total nitrogen (total phosphorus) absorbed by plants; C_t : 水体总氮(总磷)去除量 Removal amount of total nitrogen (total phosphorus) from water; R_t : 去除贡献率 Removal contribution rate. 同列中不同小写字母表示相同湿地不同级别间差异显著($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) differences between different grades of the same wetland.

的趋势,其中,水芹的总磷含量为 $6.34 \sim 7.01 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,绿狐尾藻的总磷含量为 $1.75 \sim 3.37 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。植物总磷吸收量主要集中在 CW5 和 CW6 级,分别为 13.00 和 $4.58 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,显著高于 CW7、CW8 和 CW9 级;在水芹湿地中,CW4 级植物总磷吸收量显著高于其他 3 级。水体总磷去除量 ($14.70 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) 以 CW5 级最高,明显高于其他 8 级。各级湿地中植物吸收对湿地总磷的去除贡献率为 $23.38\% \sim 97.10\%$,其中,绿狐尾藻湿地的去除贡献率较高 ($75.34\% \sim 97.10\%$),CW7、CW8 和 CW9 级的去除贡献率达 95% 以上,说明此湿地中植物吸收为湿地去磷的主要因子。

2.3 模型分析

2.3.1 曲线拟合 水芹-绿狐尾藻人工湿地(CW)中后 5 级(CW5 级至 CW9 级)的绿狐尾藻湿地为净化

系统,为了科学、合理地确定相应的工程参数,本研究主要根据这 5 级湿地中的污染物浓度变化进行曲线拟合,其中化学需氧量变化较大、相对不稳定,故选择总氮、总磷进水浓度较高的运行 20、35、40 和 60 d 以及总氮、总磷进水浓度较低的运行 10、15、25 和 30 d 的 8 组实测数据进行曲线拟合。结果表明:3 种曲线的拟合效果均较好,总氮、总磷和化学需氧量浓度的指数和二次多项式拟合的结构系数 (R^2) 均大于 0.9,线性拟合的结构系数稍小 ($R^2 > 0.7$),但均达到显著 ($P < 0.05$) 水平,其中指数拟合的结构系数达到极显著 ($P < 0.01$) 水平。

根据总氮、总磷和化学需氧量的进水浓度和对应拟合曲线的系数,通过一元回归分析得到各污染物沿程削减模型的回归方程(表 3)。

表 3 绿狐尾藻湿地污染物沿程削减模型的回归方程

Table 3 Regression equation of pollutant reduction model along the way of *Myriophyllum quitense* Kunth wetland

污染物 Pollutant	模型 Model	公式 ¹⁾ Formula ¹⁾
总氮 Total nitrogen	线性 Linear	$y = (2.40 - 0.18C_{i0})t + (27.78 + 0.55C_{i0})$
	二次多项式 Quadratic polynomial	$y = (-1.21 + 0.09C_{i0})t^2 + (9.17 - 0.78C_{i0})t + (-7.54 + 1.60C_{i0})$
	指数 Exponent	$y = (-10.80 + 1.30C_{i0})e^{(-0.24 - 0.01C_{i0})t}$
总磷 Total phosphorus	线性 Linear	$y = (0.81 - 0.23C_{i0})t + (1.57 + 0.66C_{i0})$
	二次多项式 Quadratic polynomial	$y = (-0.48 + 0.12C_{i0})t^2 + (4.17 - 1.07C_{i0})t + (-2.91 + 1.79C_{i0})$
	指数 Exponent	$y = (0.97 + 1.33C_{i0})e^{(0.23 - 0.09C_{i0})t}$
化学需氧量 Chemical oxygen demand	线性 Linear	$y = (-10.15 - 0.03C_{i0})t + (9.72 + 0.89C_{i0})$
	二次多项式 Quadratic polynomial	$y = (0.89 + 0.02C_{i0})t^2 + (-16.44 - 0.17C_{i0})t + (18.09 + 1.09C_{i0})$
	指数 Exponent	$y = (23.56 + 0.83C_{i0})e^{(-0.27 + 0.01C_{i0})t}$

¹⁾ y: 污染物出水浓度 Output water concentration of pollutant; C_{i0} : 污染物进水浓度 Input water concentration of pollutant; t: 水力停留时间 Hydraulic retention time.

2.3.2 模型检验与预测 选择与试验期间各污染物平均进水浓度最接近的运行 50 d(总氮、总磷浓度分别为 171.26 和 $17.60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 以及进水浓度适中的运行 45 和 55 d 的 3 组实测数据带入上述 3 种模型,进行相关性检验和指标评价。模型检验结果(表 4)显示:各污染物浓度模拟值与实测值间总体达到显著相关水平,相关系数均大于或等于 0.8,说明 3 种模型均具有较好的模拟效果;从相对均方根误差看,各污染物指数模型的相对均方根误差总体较小,说明绿狐尾藻湿地中总氮、总磷和化学需氧量的沿程削减模型以指数削减模型为最佳,公式分别为 $y = (-10.80 + 1.30C_{i0})e^{(-0.24 - 0.01C_{i0})t}$ 、 $y = (0.97 + 1.33C_{i0})e^{(0.23 - 0.09C_{i0})t}$ 和 $y = (23.56 + 0.83C_{i0})e^{(-0.27 + 0.01C_{i0})t}$ 。

将绿狐尾藻湿地运行期间总氮、总磷和化学需氧

量的平均进水浓度 89.12 、 9.50 和 $140.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 分别带入上述最佳削减模型,对污染物出水浓度和水力停留时间进行预测。结果(表 5)显示:在水力停留时间为 6 d 时,总氮、总磷和化学需氧量出水浓度分别为 52.92 、 6.97 和 $116.27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,均达到《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001);在水力停留时间为 24 d 时,总氮、总磷和化学需氧量出水浓度分别为 6.76 、 0.48 和 $66.54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,均达到《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)一级标准(总氮以氨氮计,浓度小于或等于 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;总磷以磷酸盐计,浓度小于或等于 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;化学需氧量浓度小于或等于 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$);在水力停留时间为 36 d 时总氮、总磷和化学需氧量出水浓度分别为 0.86 、 0.13 和 $38.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,均达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) V 类标准。

表4 绿狐尾藻湿地污染物沿程削减模型的检验结果¹⁾Table 4 Test results of pollutant reduction model along the way of *Myriophyllum quitense* Kunth wetland¹⁾

模型 Model	模拟值与实测值的相关系数 Correlation coefficient of simulated values with measured values			相对均方根误差 Relative root mean square error		
	TN	TP	COD	TN	TP	COD
45 d						
L	0.82 *	0.81 *	0.85 *	0.76	0.98	0.25
QP	0.98 ***	0.96 **	0.91 *	0.26	0.43	0.67
E	0.98 ***	0.97 ***	0.88 *	0.32	0.33	0.31
50 d						
L	0.80	0.84 *	0.81 *	1.06	1.11	0.63
QP	0.95 **	0.97 ***	0.88 *	0.39	0.86	1.23
E	0.95 **	0.95 **	0.85 *	0.58	0.87	0.62
55 d						
L	0.80	0.81 *	0.81	0.95	1.02	0.69
QP	0.96 **	0.96 **	0.83 *	0.44	0.49	1.29
E	0.97 **	0.97 **	0.80 *	0.40	0.31	0.65

¹⁾ L: 线性 Linear; QP: 二次多项式 Quadratic polynomial; E: 指数 Exponent. TN: 总氮浓度 Total nitrogen concentration; TP: 总磷浓度 Total phosphorus concentration; COD: 化学需氧量浓度 Chemical oxygen demand concentration. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$.

表5 绿狐尾藻湿地污染物沿程削减模型的预测效果

Table 5 Prediction effect of pollutant reduction model along the way of *Myriophyllum quitense* Kunth wetland

污染物 Pollutant	达到各标准的水力停留时间/d ¹⁾ Hydraulic retention time to meet each standard ¹⁾		
	1	2	3
总氮 Total nitrogen	6	12	24
总磷 Total phosphorus	6	24	30
化学需氧量 Chemical oxygen demand	—	18	36

¹⁾ 1: GB 18596—2001; 2: GB 8978—1996 一级 The first level of GB 8978—1996; 3: GB 3838—2002 V类 Class V of GB 3838—2002. —: 原液中已达标 The stock solution is up to standard.

3 讨论和结论

3.1 人工湿地对污染物的去除效果及主要机制

水芹-绿狐尾藻人工湿地对养殖废水中总氮、总磷和化学需氧量均有良好的去除效果,总去除率分别可达到 96.52%、92.79% 和 65.27%;绿狐尾藻湿地对污染物的去除起主要作用,其中,CW5 级去除率最高,对总氮、总磷和化学需氧量的去除率分别达到 39.72%、38.32% 和 23.30%。比较湿地出水水质发现,试验运行 50 d 时人工湿地中总氮、总磷、化学需氧量的出水浓度分别为 1.96、0.14 和 39.60 mg · L⁻¹,

均明显优于《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001),可达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) V类标准,其中总磷浓度达到Ⅲ类标准。表明绿狐尾藻湿地具有非常好的治污效果,与其他相关的研究结果基本一致。例如:姚燃等^[21]研究发现绿狐尾藻湿地对湖南长沙地区的养殖粪污水中总氮、总磷和化学需氧量的总去除率达 80%以上;Li 等^[12]研究了绿狐尾藻湿地对湖南地区的农用沼液的去污效果,结果显示湿地中污染物出水浓度(总氮和总磷浓度分别为 4.95 和 0.17 mg · L⁻¹)均明显低于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准(总氮和总磷浓度分别小于或等于 15 和 0.5 mg · L⁻¹)。因此,采用无动力人工湿地可以实现对养殖废水中污染物的有效去除。

大量研究结果表明:人工湿地对污染物的去除机制主要通过 3 个途径:植物吸收、底泥吸附和微生物转化^[22-23]。其中,微生物转化和植物吸收除磷是人工湿地中氮、磷去除最重要的一环^[14]。本研究主要关注植物在人工湿地中的作用,首先,水生植物能够从水体直接吸收氮、磷等营养元素,吸收的营养元素可随植物收割而移出水体^[24];其次,植物根际通过分泌有机物为微生物生长提供有利条件^[25-26],从而促进微生物群落的增殖^[27],进而为微生物脱氮起到一定程度的强化作用。另外,水生植物根系的泌氧作用也能够提高湿地中溶解氧的含量,促进氮、磷有机物的矿化。由于养殖废水均以高铵态氮(浓度大于 70 mg · L⁻¹)为特征,会对植物细胞产生一定的毒害作用,因此许多水生植物不能在养殖废水中正常生长,而绿狐尾藻具有耐受高铵态氮的特性(耐铵态氮浓度大于 200 mg · L⁻¹)^[28]且绿狐尾藻较一般水生植物生长周期更长、生物量更高(每公顷大于 900 t),对污染物的移除能力更强^[29],因此对于以处理高污染养殖废水为主要目标的人工湿地构建,绿狐尾藻是首选治污植物。但绿狐尾藻生长周期为 3 月至 12 月,冬季生物量偏低^[13],处理效率远低于夏季,这是利用绿狐尾藻湿地治污的一个主要缺陷。目前,部分学者开展了提升绿狐尾藻湿地在冬季对养殖废水中污染物去除率的相关研究。常小云等^[30]认为冬季高水位条件可促进绿狐尾藻对养殖废水中总磷的去除;阳光等^[31]通过对湿地植物配置优化,发现菖蒲(*Acorus calamus* Linn.)与绿狐尾藻组合可显著提升人工湿地对养殖废水污染物的去除率(在高污染环境下分别

提高了24.6%和21.1%)。由于夏季绿狐尾藻生长迅速,生物量大,对污染物去除效率较高,本研究仅探究了夏季绿狐尾藻湿地的治污效果,冬季治污效果有待进一步研究。

3.2 水生植物对人工湿地总氮和总磷的去除贡献及主要影响因子

植物对人工湿地(CW)中总氮和总磷的去除具有极其重要的作用。本研究中,相较于对照组,种植植物能明显提高人工湿地中总氮、总磷和化学需氧量的去除效率,总氮、总磷和化学需氧量的总去除率分别提高48.12、52.79和39.47个百分点,其中,植物吸收在人工湿地中总氮和总磷的去除贡献率分别为19.30%~56.32%和23.38%~97.10%。已有的相关研究结果存在较大差异。Gaballah等^[32]发现植物吸收对总氮、总磷去除的贡献一般不超过10%;魏泽军等^[33]通过对运行多年的潜流人工湿地的物质衡算,认为植物吸收对污水中总氮去除仅起到有限的脱氮作用,且平均去除贡献率仅为10%。本研究中,绿狐尾藻吸收对总氮和总磷的平均去除贡献率达到49.84%和90.41%。产生这种差异的原因一方面与湿地类型有关,另一方面与所选植物的生物量及水体中总氮和总磷浓度也密切相关^[34-35]。本研究中,在CW6级至CW9级中,湿地植物吸收对水体中总氮和总磷的去除量显著低于CW5级,产生这种现象的原因可能是由于绿狐尾藻吸收的养分全部来自水体,当水质改善到一定程度以后,植物生长受到养分限制,若要进一步提升湿地的净化效果,就需要引入其他类型的水生植物,如挺水植物等,这些植物吸收的养分主要来自底泥,根系环境相对稳定,对于进一步提升湿地的处理效果具有重要意义^[36-37]。因此,采用由多种植物构成的复合人工湿地系统可能具有更完善的治污潜力。

3.3 人工湿地的综合效益与工程应用前景分析

人工湿地的综合效益是决定其工程应用前景的重要因子。人工湿地的综合效益包括生态效益和经济效益。在人工湿地中,主要从通过提升人工湿地处理效率来取得更高的生态效益,如改善湿地的运行模式、选用处理效果更好的水生植物等;同时,通过选择高经济价值的湿地植物以及开展湿地综合种养等可明显提高湿地的经济效益^[8-10]。本研究结果表明:通过经济湿地(种植水芹)与生态湿地(种植绿狐尾藻)相结合的模式,完全可以实现对养殖废水的有效处理

和达标排放。通过绿狐尾藻湿地各污染物最佳沿程削减模型分析,预测在水力停留时间为24 d时各污染物出水浓度达到《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)一级标准,在水力停留时间为36 d时各污染物出水浓度达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) V类标准。此外,通过湿地前段水芹种植可获得较高的经济效益,本试验所在的安徽润航农业科技开发有限公司利用养殖废水种植水芹,每公顷产值可达45万余元。陈钰婕^[38]利用水芹去除黄浆水,净利润可达到每公顷1.5万元,这些均明显高于当地种植粮食等作物的收益水平。因此,将水生蔬菜种植与湿地生态处理技术进行有机结合是实现养殖废水高效处理与高值化利用的有效途径,有良好的应用前景和推广价值。

3.4 结论

以安徽淮南为主要研究区域,采用水芹-绿狐尾藻人工湿地处理猪场的养殖废水,具有稳定且明显的污染物削减效果,对总氮、总磷和化学需氧量的总去除率分别达到96.52%、92.79%和65.27%,试验运行50 d时总氮、总磷和化学需氧量的出水浓度分别为1.96、0.14和39.60 mg·L⁻¹,出水水质可达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) V类标准,其中总磷浓度达到Ⅲ类标准。植物吸收在湿地中总氮和总磷的去除贡献率分别为19.30%~56.32%和23.38%~97.10%,其中,绿狐尾藻吸收对总氮和总磷平均去除贡献率分别为49.84%和90.41%,为湿地脱氮除磷的主要途径。采用指数削减模型可以有效拟合绿狐尾藻湿地中污染物浓度或去除效果的沿程变化,据此可为人工湿地关键工程参数的确定提供重要的理论依据。

参考文献:

- [1] 李裕元,李希,孟岑,等.我国农村水体面源污染问题解析与综合防控技术及实施路径[J].农业现代化研究,2021,42(2):185-197.
- [2] 唐凯.国内畜禽养殖废水处理技术的研究进展[J].应用化工,2018,47(10):2274-2278.
- [3] 陈蕊,高怀友,傅学起,等.畜禽养殖废水处理技术的研究与应用[J].农业环境科学学报,2006,25(增刊):374-377.
- [4] 徐圣君,王华彩,姜参参,等.畜禽养殖废水生物处理技术研究进展[J].环境科学与技术,2021,44(增刊2):153-162.
- [5] 鲁鲁国,饶婷,范俊,等.氧化塘工艺处理规模化养猪场污水[J].中国给水排水,2009,25(8):55-57.
- [6] 刘长娥,周胜,孙会峰,等.复合人工湿地处理低浓度畜禽养

- 殖废水的净化效果[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7): 1416-1424.
- [7] KNIGHT R L, PAYNE V W E, Jr, BORER R E, et al. Constructed wetlands for livestock wastewater management [J]. Ecological Engineering, 2000, 15: 41-55.
- [8] 陈钰婕, 陆金婷, 苏世广, 等. 水芹在污水净化中的应用价值[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(7): 6-10.
- [9] 胡绵好, 袁菊红, 杨肖娥. 水生蔬菜对富营养化水体净化及资源化利用[J]. 湖泊科学, 2010, 22(3): 416-420.
- [10] 何俊乐. 经济植物型落干式人工湿地处理农村分散式生活污水的研究[D]. 南京: 东南大学, 2017: 63.
- [11] 李远航, 刘洋, 刘铭羽, 等. 稻草-绿狐尾藻复合人工湿地技术处理养猪废水综合效益分析[J]. 农业现代化研究, 2018, 39(2): 325-334.
- [12] LI X, LI Y Y, LV D Q, et al. Nitrogen and phosphorus removal performance and bacterial communities in a multi-stage surface flow constructed wetland treating rural domestic sewage[J]. Science of the Total Environment, 2020, 709: 136235.
- [13] 李裕元, 李希, 吴金水, 等. 绿狐尾藻区域适应性与生态竞争力研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(10): 2252-2261.
- [14] 刘锋, 罗沛, 刘新亮, 等. 绿狐尾藻生态湿地处理污染水体的研究评述[J]. 农业现代化研究, 2018, 39(6): 1020-1029.
- [15] 张清. 人工湿地的构建与应用[J]. 湿地科学, 2011, 9(4): 373-379.
- [16] 武威, 柴文云, 范珍, 等. 三级串联垂直潜流人工湿地的脱氮性能及微生物学特征[J]. 应用生态学报, 2021, 32(7): 2578-2588.
- [17] 李珂, 贾建丽, 卢少勇, 等. 模拟串联垂直流人工湿地去除重污染河水中氮的研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(12): 2420-2426.
- [18] 万玉文, 郭长强, 茆智, 等. 多级串联表面流人工湿地净化生活污水效果[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 220-227.
- [19] 吕伟仙, 葛滢, 吴建之, 等. 植物中硝态氮、氨态氮、总氮测定方法的比较研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2004, 24(2): 204-206.
- [20] 卢超. 两种测定湿地植物总磷方法的比较研究[J]. 江西农业学报, 2009, 21(8): 142-144.
- [21] 姚燃, 刘锋, 吴露, 等. 三级绿狐尾藻表面流人工湿地对养殖废水处理效应研究[J]. 地球与环境, 2018, 46(5): 475-481.
- [22] 卢少勇, 金相灿, 余刚. 人工湿地的氮去除机理[J]. 生态学报, 2006, 26(8): 2670-2677.
- [23] ZHANG S N, XIAO R L, LIU F, et al. Effect of vegetation on nitrogen removal and ammonia volatilization from wetland microcosms[J]. Ecological Engineering, 2016, 97: 363-369.
- [24] PINHO H J O, MATEUS D M R. Bioenergy routes for valorizing constructed wetland vegetation: an overview [J]. Ecological Engineering, 2023, 187: 106867.
- [25] SILVAN N, VASANDER H, LAINE J. Vegetation is the main factor in nutrient retention in a constructed wetland buffer [J]. Plant and Soil, 2004, 258: 179-187.
- [26] SINHA R K, BHARAMBE G, BAPAT P. Removal of high BOD and COD loading of primary liquid waste products from dairy industry by vermi-filtration technology using earthworms[J]. Indian Journal of Environmental Pollution, 2007, 27: 486-501.
- [27] MUENCH C H, NEU T, KUSCHK P, et al. The root surface as the definitive detail for microbial transformation processes in constructed wetlands: a biofilm characteristic [J]. Water Science and Technology, 2007, 56: 271-276.
- [28] LAI W L, WANG S Q, PENG C L, et al. Root features related to plant growth and nutrient removal of 35 wetland plants [J]. Water Research, 2011, 45(13): 3941-3950.
- [29] 李红芳, 刘锋, 黎慧娟, 等. 生物滤池/人工湿地/稳定塘工艺处理农村分散污水[J]. 中国给水排水, 2015, 31(2): 84-87.
- [30] 常小云, 张树楠, 张苗苗, 等. 绿狐尾藻生态沟渠在低温状态下对磷的去除[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(4): 852-858.
- [31] 阳光, 李红芳, 谢陈, 等. 低温环境下人工湿地植物组配对养殖废水的处理效果研究[J]. 地球与环境, 2022, 50(2): 252-260.
- [32] GABALLAH M S, ABDELWAHAB O, BARAKAT K M, et al. A novel horizontal subsurface flow constructed wetland planted with *Typha angustifolia* for treatment of polluted water [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27: 28449-28462.
- [33] 魏泽军, 谢建平, 黄玉明. 潜流人工湿地演变对废水中有机物、氮及磷去除的影响[J]. 环境科学, 2012, 33(11): 3812-3819.
- [34] KRYWULT M, SMYKLA J, WINCENCIAK A. The presence of nitrates and the impact of ultraviolet radiation as factors that determine nitrate reductase activity and nitrogen concentrations in *Deschampsia antarctica* Desv. around penguin rookeries on King George Island, Maritime Antarctica [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2013, 224: 1563.
- [35] LIU X H, GUO X C, LIU Y, et al. A review on removing antibiotics and antibiotic resistance genes from wastewater by constructed wetlands: performance and microbial response [J]. Environmental Pollution, 2019, 254: 112996.
- [36] 杨林, 伍斌, 赖发英, 等. 7种典型挺水植物净化生活污水中氮磷的研究[J]. 江西农业大学学报, 2011, 33(3): 616-621.
- [37] 元文革, 郑建伟, 谷建才, 等. 滦河上游4种水生植物的水质净化研究[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(1): 109-114.
- [38] 陈钰婕. 水芹对豆制品副产物黄浆水的净化效果及生长与品质分析[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2022: 43.

(责任编辑: 郭严冬)