

生态强化技术对污水厂尾水深度处理的研究

陈波^{1*}, 谢裕兴¹, 钟晨¹, 李明²

(1. 中国葛洲坝集团水务运营有限公司, 湖北 武汉 430000;
2. 中国科学技术大学物理学院, 安徽 合肥 230000)

摘要:基于水生植物-动物-微生物协同作用的污水生态净化理念, 研制出一种利用特征波长光源强化植物生长的可控型生态强化装置对污水厂尾水进行深度处理。研究表明, 水力停留4 d时装置具有最佳的污水净化效果, COD、TP、TN、NH₄⁺-N的出水浓度分别为18.73、0.66、2.74、0.7 mg/L, 根据相关国家标准规定, 其对COD和NH₄⁺-N的去除效果达到了地表Ⅲ类标准, 对TN和TP的去除效果分别达到了一级A和一级B的标准, 对TP和NH₄⁺-N的去除效果仍有很大的提升空间; 与人工湿地相比, 生态强化装置对污染物的去除更具优势。

关键词:生态净化; 生态强化; 污水厂尾水; 深度处理

中图分类号: X703.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2022)04-0231-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.04.045

Research on ecological enhancement technology for advanced treatment of tailwater from wastewater treatment plant

CHEN Bo^{1*}, XIE Yu-xing¹, ZHONG Chen¹, LI Ming²

(1. China Gezhouba Group Water Operation Co., Ltd., Wuhan 430000, China;

2. School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230000, China)

Abstract: Based on the ecological purification concept about synergistic effect of aquatic plants-animals-microbes on sewage, a controllable ecological enhancement device that uses characteristic wavelength light sources to enhance plant growth is developed for advanced treatment of tail water from wastewater treatment plant. Research shows that the device has the best purification effect on sewage when the hydraulic retention time is 4 days. The concentrations of COD, TP, TN, and NH₄⁺-N in effluent are 18.73 mg·L⁻¹, 0.66 mg·L⁻¹, 2.74 mg·L⁻¹, and 0.7 mg·L⁻¹, respectively. According to China's relevant national standards, the removal effects on COD and NH₄⁺-N can reach Class III standards for surface water, and the removal effects on TN and TP can reach the first level A standard and the first level B standard, respectively. The device has a lot of room for improvement in the removal effect of TP and NH₄⁺-N. In addition, the device has more advantages in removing pollutants than constructed wetlands.

Key words: ecological purification; ecological enhancement; tailwater from wastewater treatment plant; advanced treatment

目前我国大部分污水处理厂的达标限为一级A标准, 但仍有一部分污水处理厂为一级B排放标准, 如果以地表水标准进行评价, 这一部分污水处理厂排放的一级B尾水均属于劣V类水, 此类排放标准的污水处理厂尾水若直接排入自然水体, 将直接导致湖泊、河流的水质恶化, 因此很多地区逐步提高了城镇污水处理厂的排放标准, 这也促使众多污水处理厂开启了提标改造的工作, 而当前污水处理厂提标改造所涉及的深度处理工艺又普遍存在投资高、建设周期长的问题, 不具备可持续发展态势^[1-3]。因此, 现在亟需一种生态、经济的先进技术来解决这一问题。对此, 本项目研究基于水生植物-动物-微生物协同作用的污水生态净化理念, 研

制开发一种生态强化型的尾水深度处理装置, 该装置通过人工植物生长灯在有益于植物光合作用的特定波长下延长植物光照时间^[4], 进而加快植物生长并提高植物对污染物的去除效率, 另外装置通过可调控系统, 使本技术应用不受自然环境变化的影响, 保障装置具有恒温、恒湿的内部环境, 进而最大限度地提高生态系统的自净能力。

1 实验部分

1.1 实验材料

1.1.1 实验设备材料

主要实验设备为本项目研究开发的生态强化实验装置。

收稿日期: 2021-04-27; 修回日期: 2022-02-14

作者简介: 陈波(1971-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为水污染治理、水环境项目技术研究, 通讯联系人, 623363871@qq.com。

根据相关研究表明^[4],植物在 420~500 nm(蓝光)叶绿素与类胡萝卜素吸收比例最大,对光合作用影响最大,在 620~750 nm(红)叶绿素吸收率高,对光合作用与光周期效应有显著影响。因此本项目研究开发的生态强化实验装置采用 420~500 nm 和 620~750 nm 波长段的红、蓝组合 LED 光源作为植物生长的光源,以此强化实验装置内植物的生长,进而提升植物对污水中污染物的净化效果。

实验检测所需仪器见表 1。

表 1 实验仪器

名称	型号	生产厂家
COD 恒温加热器	LB-901A	青岛路博建业环保科技有限公司
紫外分光光度计	UV-1200	上海美普达仪器有限公司
立式压力蒸汽灭菌器	BXM-30R	上海东亚压力容器制造有限公司

1.1.2 实验材料

(1) 植物

为保证植物的适应性,实验选用的去污效率高且常见的伊乐藻、菹草、狐尾藻和水葫芦等植物^[5-12]均采自实验所在地湖北省黄冈市,其中伊乐藻采自黄冈市赤壁公园,菹草采自黄冈市白潭湖,狐尾藻采自黄冈市遗爱湖公园,水葫芦采自黄冈市长江流域段。

(2) 药剂

小试实验和中试实验所需实验检测药剂见表 2。

表 2 实验药剂

药品名称	化学式	纯度	生产厂家
过硫酸钾	$K_2S_2O_8$	分析纯	国药集团 化学试剂 有限公司
氢氧化钠	NaOH	分析纯	
酒石酸钾钠	$C_4O_6H_4KNa$	分析纯	
重铬酸钾	$K_2Cr_2O_7$	分析纯	
硫酸亚铁铵	$(NH_4)_2Fe(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$	分析纯	
硫酸	H_2SO_4	优级纯	
盐酸	HCl	优级纯	
硫酸汞	$HgSO_4$	分析纯	
硫酸银	Ag_2SO_4	分析纯	
抗坏血酸	$C_6H_8O_6$	分析纯	
钼酸铵	$H_8MoN_2O_4$	分析纯	
酒石酸锑钾	$C_8H_4K_2O_{12}Sb_2$	分析纯	

注:实验用水均为去离子水。

1.2 实验方法

1.2.1 小试实验方法

小试实验采用 160 L 的 PVC 水桶进行植物种植,实验用水采用葛洲坝水务(黄冈)有限公司的原水和尾水按 1:5 比例混合配制而成(注:该污水处理厂出水执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》GB 18918—2002 中规定的一级 A 标准),选取生长旺盛、大小相似的伊乐藻、菹草、狐尾藻和水葫芦等植物的植株进行小试水质净化实验,每种植物设 4 组平行对照组,通过连续 5 d 检测水桶内 TP、TN、 NH_4^+-N 、COD 4 项指标,分析 4 种植物在不同环境下的去污效率,筛选出实验箱装置环境下的优势植物。

1.2.2 中试实验方法

中试实验所用实验箱装置的水体容积为 12 m³,装置内分层分格种植伊乐藻、菹草、狐尾藻和水葫芦等植物,实验用水采用污水厂原水与尾水按 1:3 比例混合制成置于装置外储存桶内,实验过程利用调节实验箱装置进水量的方式进而控制水力停留时间,本实验进水量分别控制在 3、5、6、12 m³,分别对应水力停留时间为 4、2.4、2、1 d,污水以表面流的方式经过实验箱装置。通过每日对进出水 TP、TN、 NH_4^+-N 、COD 4 项指标进行测定,根据 4 项指标测定结果对比分析不同水力停留时间下实验装置对污水深度处理的效果,进而确定实验箱的最佳水力停留时间。

1.3 分析方法

TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ 636—2012); TP 采用钼酸铵分光光度法(HJ 671—2013); COD_{Cr} 采用重铬酸盐法(HJ 828—2017); NH_4^+-N 采用纳氏试剂分光光度法(HJ 535—2009)。为明确 4 种水生植物的水质净化能力以及水生植物氮、磷吸收在水质净化过程中的作用,同时为确定实验装置的最佳水力停留时间,本研究在测定水质 COD、TN、 NH_4^+-N 、TP 浓度的基础上进行水体 COD、氮、磷的去除率计算,计算方法见式(1):

$$R = [(C_0 - C_1)/C_0] \times 100\% \quad (1)$$

式中, C_0 、 C_1 分别为小试试验水质初始浓度、最终浓度和中试试验每日进水浓度、出水浓度, mg/L; 采用 SPSS 数据处理系统和 Excel 软件对实验结果进行方差分析。

2 结果与讨论

2.1 小试实验结果与讨论

2.1.1 4种植物对 COD 的去除效果

根据实验数据汇总得出表 3 结果发现,4 种植物对污水中 COD 的净化效果明显,实验前期 COD 的去除迅速,随着时间的延长,COD 去除速率趋于平稳。伊乐藻对 COD 的去除效率明显高于其他 3 种植物($P < 0.05$),4 种植物去除效果从高到底依次为伊乐藻(70.38%)>水葫芦(60.98%)>菹草(59.52%)>狐尾藻(51.54%)。有相关研究表明^[13],植物对于污水中 COD 的去除主要依靠植物根系的吸收以及根际微生物的作用,而伊乐藻具有光合能力强、每茎节均能萌发根系、生长迅速等特点,进行光合作用产生的氧气向下通过根状茎和茎节上的不定根输送到根际,使水体中溶解氧增加,为根区微生物的活动创造了有利的条件,促进了有机物的好氧分解,同时每茎节萌发的根系可强化对污水中 COD 的吸收,也为根系微生物提供了更多的生长空间,从而提高 COD 去除率^[14]。

表 3 小试试验中 4 种植物连续 5 日污染物
COD 浓度变化及去除率

植物	初始 浓度/ (mg· L ⁻¹)	第一天 浓度/ (mg· L ⁻¹)	第二天 浓度/ (mg· L ⁻¹)	第三天 浓度/ (mg· L ⁻¹)	第四天 浓度/ (mg· L ⁻¹)	第五天 浓度/ (mg· L ⁻¹)	去除率/ %
伊乐藻	54.45	45.36	41.33	29.23	21.17	16.13	70.38
菹草	42.34	38.31	34.27	28.23	21.17	17.14	59.52
水葫芦	62.00	50.32	46.18	31.12	26.10	24.19	60.98
狐尾藻	52.00	43.35	34.14	29.12	26.10	25.20	51.54

2.1.2 4种植物对 TP 的去除效果

根据实验数据汇总得出表 4 结果发现,4 种植物对污水中 TP 的去除效果明显,实验前 3 d TP 的浓度迅速降低,第 4~5 d 后 TP 浓度趋于平稳。伊乐藻对 TP 的去除效率明显高于其他 3 种植物($P < 0.05$),4 种植物去除效果从高到底依次为伊乐藻(71.95%)>狐尾藻(68.29%)>菹草(62.82%)>水葫芦(56.98%)。有相关研究表明^[15],植物对于污水中 TP 的去除主要包括吸附与沉淀、微生物的吸收与过量积累以及植物的吸收作用,自然界中植物对于总磷的吸收量很少,因此对于污水中 TP 的去

除主要取决于植物根系的吸附作用和微生物的吸收、积累作用。正如对表 3 分析所言,伊乐藻具有每茎节均能萌发根系和生长迅速的特点,在污水净化过程中每茎节萌发的根系可进一步强化对 TP 的吸附作用,同时为微生物提供更多的生长空间,进而提高微生物对 TP 的吸收量和积累量。

表 4 小试试验中 4 种植物连续 5 日污染物
TP 浓度变化及去除率

植物	初始 浓度/ (mg· L ⁻¹)	第一天 浓度/ (mg· L ⁻¹)	第二天 浓度/ (mg· L ⁻¹)	第三天 浓度/ (mg· L ⁻¹)	第四天 浓度/ (mg· L ⁻¹)	第五天 浓度/ (mg· L ⁻¹)	去除率/ %
伊乐藻	0.82	0.41	0.33	0.28	0.24	0.23	71.95
菹草	0.78	0.46	0.40	0.38	0.33	0.29	62.82
水葫芦	0.86	0.63	0.55	0.43	0.43	0.37	56.98
狐尾藻	0.82	0.40	0.34	0.29	0.27	0.26	68.29

2.1.3 4种植物对 N 元素的去除效果

根据实验数据汇总得出表 5 和表 6,结果发现,4 种植物对污水中 TN 和 NH₄⁺-N 的去除效果明显。菹草对 TN 和 NH₄⁺-N 的去除效率显著高于其他 3 种植物($P < 0.05$),4 种植物对 TN 的去除效果从高到底依次为菹草(93.45%)>水葫芦(91.43%)>伊乐藻(75.37%)>狐尾藻(72.76%),对 NH₄⁺-N 的去除效果从高到低依次为菹草(80.95%)>水葫芦(79.07%)>伊乐藻(77.78%)>狐尾藻(75.68%),4 种植物对 TN 和 NH₄⁺-N 的去除效果呈现出正相关性,这与谢东升等^[14]、陈双等^[16]研究人员的研究发现一致,有相关研究表明^[17],植物对 N 元素的去除主要途径包括氨挥发、氨化、硝化反硝化以及植物的摄取,其中 TN 的去除主要依靠反硝化菌的反硝化

表 5 小试试验中 4 种植物连续 5 日污染物
TN 浓度变化及去除率

植物	初始 浓度/ (mg· L ⁻¹)	第一天 浓度/ (mg· L ⁻¹)	第二天 浓度/ (mg· L ⁻¹)	第三天 浓度/ (mg· L ⁻¹)	第四天 浓度/ (mg· L ⁻¹)	第五天 浓度/ (mg· L ⁻¹)	去除率/ %
伊乐藻	2.72	2.47	2.05	1.78	1.19	0.67	75.37
菹草	2.29	2.13	0.92	0.66	0.37	0.15	93.45
水葫芦	2.45	1.76	1.36	1.32	0.99	0.21	91.43
狐尾藻	2.90	1.92	1.44	1.25	1.03	0.79	72.76

表 6 小试试验中 4 种植物连续 5 日污染物
NH₄⁺-N 浓度变化及去除率

植物	初始	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	去除率/ %
	浓度/ (mg· L ⁻¹)	浓度/ (mg· L ⁻¹)	浓度/ (mg· L ⁻¹)	浓度/ (mg· L ⁻¹)	浓度/ (mg· L ⁻¹)	浓度/ (mg· L ⁻¹)	
伊乐藻	0.36	0.26	0.16	0.12	0.09	0.08	77.78
菹草	0.42	0.23	0.17	0.14	0.12	0.08	80.95
水葫芦	0.43	0.33	0.27	0.20	0.15	0.09	79.07
狐尾藻	0.37	0.36	0.21	0.14	0.11	0.09	75.68

作用, NH₄⁺-N 的去除主要是硝化菌的硝化作用。实验中菹草密集型的生长给反硝化菌提供了生长所需的厌氧环境, 提升反硝化的效率; 菹草密集的生长给硝化菌提供了附着生长的空间, 从一定程度上增加了硝化菌的量, 进而促进了菹草对 NH₄⁺-N 的去除。

2.2 中试实验结果与讨论

2.2.1 不同水力停留时间下对 COD 的去除效果

根据实验数据汇总得出表 7, 结果发现, 随着水力停留时间的延长, 实验装置对于 COD 的去除效果逐渐提升, 从高到底的排序依次为 4 d (69.66%) > 2.4 d (68.30%) > 2 d (66.20%) > 1 d (64.09%), 其中水力停留时间 4 d 时进出水 COD 浓度分别为 61.73、18.73 mg/L, 根据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 中的规定, 该水力停留时间下出水 COD 已达到地表 III 类水标准。相关研究表明^[13], 以植物为主的生态系统对于水体中 COD 的去除主要依靠沉淀、过滤、根系生物膜的吸附与吸收、微生物的代谢分解作用, 更长的水力停留时间有利于水体中 COD 的沉淀, 同时植物根系生物膜对有机物的吸附与吸收、微生物的代谢分解以及水体中水生动物的摄食等作用将更加彻底。

表 7 中试试验中不同水力停留时间下
COD 浓度变化及去除率

停留时间/ d	进水浓度/ (mg·L ⁻¹)	出水浓度/ (mg·L ⁻¹)	去除率/ %
1.0	39.13	14.05	64.09
2.0	37.87	12.80	66.20
2.4	47.60	15.09	68.30
4.0	61.73	18.73	69.66

2.2.2 不同水力停留时间下对 TP 的去除效果

根据实验数据汇总得出表 8, 结果发现, 随着水力停留时间的延长, 实验装置对污水中 TP 的去除效果逐渐提升, 从高到底排序为 4 d (74.42%) > 2.4 d (61.78%) > 2 d (60.16%) > 1 d (56.04%), 其中水力停留时间 4 d 时进出水 TP 浓度分别为 2.58、0.66 mg/L, 根据《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 中的规定, 该出水达到一级 B 标准, 结合去除效率对比水力停留时间 1 d 时的进出水浓度 0.91、0.40 mg/L, 水力停留时间处于 4 d 时, 出水水质有极大的提升空间。根据卢少勇等^[15]研究, 植物生态系统对于污水中的总磷的去除主要与沉积、吸附与沉淀、微生物吸收与过量积累以及植物的吸收有关。随着水力停留时间的延长, 污水中的总磷沉淀过程的时间更加充分, 同时生态系统中微生物和植物对水中 P 元素的吸附、吸收与积累的量也更多。

表 8 中试试验中不同水力停留时间下
TP 浓度变化及去除率

停留时间/ d	进水浓度/ (mg·L ⁻¹)	出水浓度/ (mg·L ⁻¹)	去除率/ %
1.0	0.91	0.40	56.04
2.0	1.23	0.49	60.16
2.4	1.57	0.60	61.78
4.0	2.58	0.66	74.42

2.2.3 不同水力停留时间下对 N 元素的去除效果

根据实验数据汇总得出表 9 和表 10, 结果发现, 随着水力停留时间的延长, 实验装置对于污水中 TN 的去除效果也逐渐提升, 从高到低的排序为 4 d (67.65%) > 2.4 d (65.87%) > 2 d (65.42%) > 1 d (57.49%), 其中水力停留时间 4 d 时进出水 TN 浓度分别为 8.47、2.74 mg/L, 参照《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002), 该出水 TN 达到一级 A 标准; 对于 NH₄⁺-N 的去除效果却随着水力停留时间的延长与对 TN 的去除效果呈现出负相关性, 从高到低的排序为 1 d (96.26%) > 2 d (93.99%) > 2.4 d (90.54%) > 4 d (90.28%), 其中水力停留时间 1 d 和 4 d 时进出水 NH₄⁺-N 浓度分别为 2.94、0.11 mg/L 和 7.20、0.70 mg/L, 参照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002), 水力停留时间 1 d 和 4 d 时出水水质分别达到地表 I 类和地表 III

类水标准,其中水力停留时间 4 d 时的出水 NH_4^+-N 水平仍有一定幅度的提升空间。根据卢少勇等^[17]研究表明,植物生态系统对于污水中 N 元素去除主要与氨挥发、氨化、硝化与反硝化以及植物和微生物的摄取有关。其中 NH_4^+-N 的去除主要和氨化、硝化作用相关,此 2 步反应过程均需在有氧环境中完成,由于更短的水力停留时间,污水在装置中的流速更快,高流速将使水体更容易充氧,这将更有利于硝化作用的进行,进而在一定程度上提升 NH_4^+-N 的去除率;而对于 TN 的去除主要依靠反硝化菌在低氧或厌氧环境下的反硝化作用,因此更长的水力停留时间在一定程度上有益于植物生态系统对 TN 的去除。

表 9 中试试验中不同水力停留时间下 TN 浓度变化及去除率

停留时间/ d	进水浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	出水浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	去除率/ %
1.0	10.02	4.26	57.49
2.0	7.20	2.49	65.42
2.4	5.45	1.86	65.87
4.0	8.47	2.74	67.65

表 10 中试试验中不同水力停留时间下 NH_4^+-N 浓度变化及去除率

停留时间/ d	进水浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	出水浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	去除率/ %
1.0	2.94	0.11	96.26
2.0	4.49	0.27	93.99
2.4	3.70	0.35	90.54
4.0	7.20	0.70	90.28

2.2.4 实验装置与人工湿地的污染物净化效果对比

根据中试实验研究结果综合分析,生态强化装置在水力停留 4 d 时对污水中的污染物具有最佳的去除效果,因此选取实验装置在 4 d 时对污染物的净化效果与杜良梅等^[18]对抚仙湖马料河人工湿地、星云湖渔村河人工湿地以及洱源县城污水处理厂尾水人工湿地对污染物的净化效果的研究数据对比,得出表 11~表 14,实验装置对 TN、 NH_4^+-N 、TP 以及 COD 的去除率均要明显高于人工湿地。其中实验

装置对 N 元素的去除呈现出进水 TN 和 NH_4^+-N 的浓度均高于其他 3 块人工湿地,但出水效果却和人工湿地相当,甚至更好;对 TP 的去除,实验装置在进水浓度远高于人工湿地的情况下,出水效果虽不及 3 块人工湿地,但较高的去除效率说明实验装置对于 TP 的去除仍有很大的提升空间;对 COD 的去除,实验装置在进水浓度较高的情况下,出水浓度比 3 块人工湿地更低。综合来看,本项目研究装置对污染物的净化效果要强于相似工作机理的人工湿地,说明装置内构建的植物-动物-微生物的生态系统在特定波长光的长时间照射下更大地发挥出植物对污染物的去除作用,同时植物更快地生长促进整个生态系统对污染物发挥净化作用,因此本项目研究的恒温、恒湿、可控型装置对污染物的净化效果要强于室外、可控性弱的人工湿地。

表 11 实验装置与人工湿地对 COD 去除效果对比

名称	进水浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	出水浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	去除率/ %
抚仙湖马料河人工湿地	45.75	22.06	51.78
星云湖渔村河人工湿地	67.80	31.64	53.33
洱源县城污水处理厂 尾水人工湿地	32.00	17.33	45.84
本实验研究装置	61.73	18.73	69.66

表 12 实验装置与人工湿地对 TP 去除效果对比

名称	进水浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	出水浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	去除率/ %
抚仙湖马料河人工湿地	0.440	0.280	36.36
星云湖渔村河人工湿地	0.735	0.517	29.66
洱源县城污水处理厂 尾水人工湿地	0.470	0.275	41.49
本实验研究装置	2.580	0.660	74.42

表 13 实验装置与人工湿地对 TN 去除效果对比

名称	进水浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	出水浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	去除率/ %
抚仙湖马料河人工湿地	5.41	2.80	48.24
星云湖渔村河人工湿地	6.47	2.97	54.10
洱源县城污水处理厂 尾水人工湿地	6.49	3.42	47.30
本实验研究装置	8.47	2.74	67.65

表 14 实验装置与人工湿地对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果对比

名称	进水浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	出水浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	去除率/ %
抚仙湖马料河人工湿地	1.70	1.05	38.24
星云湖渔村河人工湿地	2.12	0.89	58.02
洱源县污水处理厂 尾水人工湿地	2.32	1.14	50.86
本实验研究装置	7.20	0.70	90.28

3 结论

(1) 在小试试验的 4 种植物中,伊乐藻对于污水中 COD 和 TP 的去除具有显著的优异性,对于 COD 和 TP 的去除率可达到 70.38%、71.95%,伊乐藻可作为调控 COD 和 TP 浓度的先锋植物;菹草对于污水中 N 元素的去除具有显著的效果,对 TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率可达到 93.45%、80.95%,4 种植物对 TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果呈现出正相关性,菹草可作为调控 N 元素浓度的先锋植物。

(2) 在中试试验中,在 1、2、2.4、4 d 的水力停留时间下对 COD 的去除率分别为 64.09%、66.20%、68.30%、69.66%;对于 TP 的去除率分别为 56.04%、60.16%、61.78%、74.42%;对 TN 的去除率分别为 57.49%、65.42%、65.87%、67.65%;对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率分别为 96.26%、93.99%、90.54%、90.28%。

(3) 综合来看实验装置在水力停留时间为 4 d 时具有最佳处理效果,根据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)和《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的标准,对 COD 的去除效果达到地表Ⅲ类标准,对 TP 的去除效果达到一级 B 标准,但还有很大提升空间,对 TN 的去除效果达到一级 A 标准,对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果达到地表Ⅲ类标准,仍有一定幅度的提升空间。

(4) 实验装置与人工湿地相比,对污水中 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 以及 COD 的去除率要明显优于人工湿地,综合分析生态强化装置对污水中污染物的净化效果要强于相似工作机理的人工湿地。

参考文献

- [1] Bertin A, Inostroza P A, Quinones R A A. Theoretical estimation of the concentration of steroid estrogens in effluents released from municipal sewage treatment plants into aquatic ecosystems of central-southern Chile [J]. Science of the Total Environment, 2009, 407 (17): 4965-4971.
- [2] 韩瑞瑞,袁林江,孔海霞.复合垂直流人工湿地净化污水厂二级出水的研究[J].中国给水排水,2009,25(21):50-52.
- [3] 管策,郁达伟,郑祥,等.我国人工湿地在城市污水处理厂尾水脱氮除磷中的研究与应用进展[J].农业环境科学学报,2012,31(12):2309-2320.
- [4] 樊晓雅,初燕芳,袁玉麟.LED 灯在植物工厂中的应用及对植物生长的影响[J].乡村科技,2020,11(29):107-109.
- [5] 王艳英,王晓磊,邵爱玲,等.水生植物净化水质功能研究进展[J].中国城市林业,2017,15(4):6-10.
- [6] 沈应时,张云霄,张翠英,等.5 种植物沉床系统对富营养化水体修复效果研究[J].环境保护科学,2017,43(1):71-76.
- [7] 殷红桂,唐子夏,唐可欣,等.大型水生植物在水质修复过程中的应用现状及发展[J].环境科技,2017,30(1):67-70.
- [8] 林运通,崔理华,范远红,等.5 种湿地沉水植物对模拟污水厂尾水的深度处理[J].环境工程学报,2016,10(12):6914-6922.
- [9] 徐志婧,刘维,苏振铎,等.4 种沉水植物对再生水中氮磷的去除速率和耐受范围[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2015,43(8):181-188.
- [10] 金树权,周金波,包薇红,等.5 种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较[J].环境科学,2017,38(1):156-161.
- [11] 任文君,田在锋,宁国辉,等.4 种沉水植物对白洋淀富营养化水体净化效果的研究[J].生态环境学报,2011,20(2):345-352.
- [12] 祝宇慧,赵国智,李灵香玉,等.湿地植物对模拟污水的净化能力研究[J].农业环境科学学报,2009,28(1):166-172.
- [13] 丁怡,王玮,宋新山,等.人工湿地在水质净化中的应用及研究进展[J].工业水处理,2017,37(3):6-10.
- [14] 谢东升,朱文逸,陈劲鹏,等.5 种华南地区水生植物对城市生活污水的净化效果[J].环境工程学报,2019,13(8):1903-1908.
- [15] 卢少勇,金相灿,余刚.人工湿地的磷去除机理[J].生态环境,2006,(2):391-396.
- [16] 陈双,王国祥,许晓光,等.水生植物类型及生物量对污水处理厂尾水净化效果的影响[J].环境工程学报,2018,12(5):1424-1433.
- [17] 卢少勇,金相灿,余刚.人工湿地的氮去除机理[J].生态学报,2006,(8):2670-2677.
- [18] 杜良梅,张丽,和丽萍,等.利用人工湿地处理云南高原湖泊入湖河水的净化效果分析[J].环境科学导刊,2013,32(6):44-47. ■