

南方 6 类挺水植物净化污水氮素的对比试验研究

湛宏伟^{1,2,3}, 蔡雪璨¹, 杨欣怡¹, 辛龙¹, 喻妮厚⁴, 周慧⁴, 于莎莎⁴

(1. 长沙理工大学 水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 长沙理工大学 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114; 3. 长沙理工大学 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114; 4. 湖南省水文水资源勘测中心, 湖南 长沙 410005)

摘要:【目的】对比研究各类挺水植物对污水中总氮和氨氮的净化效果和机理。【方法】筛选水芹菜、鱼腥草、再力花、风车草、花叶芦竹和香根草 6 类挺水植物, 采用室外大棚无土水培种植试验, 定期检测 4 类污水总氮与氨氮含量、pH、DO 及植物生理指标、环境温度。【结果】① 在试验前 14 d, 各类植物对污水中氨氮和总氮的去除率快速升高, 到第 21 天, 升高速率减缓, 到第 28 天, 部分出现一定程度的反弹, 此后振荡升高直至基本稳定。② 随着污水浓度的上升, 植物除氮能力也随之提高。植物代谢能力和生长趋势与植物除氮能力呈正相关关系。③ 试验污水 pH 均下降。其中, 再力花盆裁系统中污水的 pH 下降幅度最大, 污水浓度大小与 pH 变化的相关性不明显, DO 含量有一定的起伏变化, 但水体环境基本为氧化环境。各类植物中花叶芦竹和再力花试验污水的 DO 含量相对较高。【结论】植物自身生长需要和植物根系的微生物活动是挺水植物净化水体氮素的主要机制。过氧化氢酶活性、根系活力和植物生长量等与植物净化水体氮污染能力呈正相关关系。推荐再力花和花叶芦竹作为南方构建湿地系统处理氮素污水的首选挺水植物。

关键词: 挺水植物; 总氮; 氨氮; 除氮能力; 根系活力; 过氧化氢酶活性

中图分类号: X173

文献标志码: A

Experimental study on the removal of nitrogen from sewage by 6 types of emergent plants in South China

CHEN Hong-wei^{1,2,3}, CAI Xue-can¹, YANG Xin-yi¹, XIN Long¹,
YU Wei-hou⁴, ZHOU Hui⁴, YU Sha-sha⁴

(1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3. Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 4. Hunan Hydrology and Water Resources Survey Center, Changsha 410005, China)

Abstract: [Purposes] The paper aims to compare and study the purification effect and mechanism of various emergent plants on total nitrogen and ammonia nitrogen in sewage. [Methods] Six types of emergent plants, including *Oenanthe javanica* (Bl.) DC., *Houttuynia cordata* Thunb., *Thalia dealbata* Fraser, *Cyperus alternifolius* (L.) Rikli, *Arundo donax* var. *versicolor* and *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash, were selected, through outdoor greenhouse soilless hydroponic planting test, the content of total nitrogen and ammo-

收稿日期: 2021-04-12

基金项目: 湖南省水利一般科技项目(XSKJ2019081-43); 湖南省水利重大科研项目(XSKJ2019081-09)

通信作者: 湛宏伟(1969—), 男, 副教授, 主要从事水土污染防治与控制技术方面的研究。E-mail: 303424977@qq.com

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxzbzk/home>

nia nitrogen, pH, DO of the four types of sewage, plant physiological indicators and environmental temperature were tested regularly. [Findings] ① During the first 14 d of the test, the removal rate of ammonia nitrogen and total nitrogen in sewage increases rapidly, and on the 21st day, the increase rate slows down, and on the 28th day, a certain degree of rebound occurs in some parts. After that, it fluctuates until basically stable. ② As the concentration of sewage increases, the ability of plants to remove nitrogen also increases. The metabolic capacity and growth trend of plants are positively correlated with the ability of plants to remove nitrogen. ③ The pH of the experimental sewage drops. Among them, the pH of the sewage in the potted plant system of *Thalia dealbata* Fraser has the largest decrease, and the correlation between the concentration of the sewage and the change of pH is not obvious. The content of DO has certain fluctuations, but the water environment is basically oxidized. Among all kinds of plants, the content of DO in the experimental sewage of *Arundo donax* var. *versicolor* and *Thalia dealbata* Fraser is relatively higher. [Conclusions] The growth needs of plants and the microbial activities of plant roots are the main mechanisms for emergent plants to purify nitrogen in water bodies. Catalase activity, root vitality and plant growth are positively correlated with the ability of plants to purify nitrogen pollution in water bodies. It is recommended that *Arundo donax* var. *versicolor* and *Thalia dealbata* Fraser be selected as the first emergent plants to treat nitrogen-polluted sewage in wetland system construction in South China.

Key words: emergent plant; total nitrogen; ammonia nitrogen; nitrogen removal capacity; root vitality; catalase activity

人工湿地是一种由基质、植物和微生物协同作用达到去除污染物的人工生态系统^[1-2]。人工湿地基于其生态水处理方式,具有成本低、能耗少、管理要求低的优点,且能够形成一定的生态景观并创造经济价值^[3],当前应用比较广泛。挺水植物生物量较大,能够有效提高污水氮素的去除效果,是人工湿地系统中常见的配置植物^[4]。然而,受水污染程度、植物种类和气候条件的影响,挺水植物净化污水的效率差别较大^[5]。试验发现,相同条件下,水芹菜对总氮的去除率要高于氨氮^[6]。不同污水浓度、不同地理和气候条件下植物的氮素去除率有明显差别。山东的试验结果表明,香蒲、茭白和再力花的氮素去除率随污水浓度的升高而减小^[7-9];湖北的试验发现,香蒲和花叶芦竹的总氮去除能力在高浓度氮素污染下表现更好^[10];赣南地区再力花的除氮率随污水含氮浓度的升高而增大^[11];广州地区鸢尾对污水氨氮的去除效果较好^[12];海河流域的黄花鸢尾则对总氮的去除效果较好^[13]。

我国幅员辽阔,各地气候条件和植物种类有较大区别,其净化污水氮素的能力也必然存在差

异。因此,在对比分析现有成果的基础上,筛选水芹菜、鱼腥草、再力花、风车草、花叶芦竹和香根草 6 类中国南方常见的挺水植物,采用室外大棚无土水培的方式开展各类植物去除 4 类污水中氮的对比试验,通过定期监测污水中总氮和氨氮的含量、pH、DO 以及植物生理指标和环境温度等,对比研究不同植物在不同浓度污水下的净化机制和效果,为南方湿地系统建设中挺水植物的筛选和配置提供参考和依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验所用挺水植物采购自长沙红星花卉市场。4 类人工污水由磷酸二氢钾、葡萄糖、氯化铵、硝酸钾依照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的 IV 类和 V 类地表水环境质量标准及《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 和一级 B 污染物排放标准分别配制而成,其所在试验组的编号分别为 T₁、T₂、T₃

和 T_4 , T_0 为对照组,对应浓度见表 1。

表 1 人工污水配制浓度
Table 1 Preparation concentration of
artificial sewage mg/L

试验组	氨氮	总氮	总磷	化学需氧量组分
T_0	0.0	0.0	0.0	0
T_1	1.5	1.5	0.3	30
T_2	2.0	2.0	0.4	40
T_3	5.0	15.0	0.5	50
T_4	15.0	25.0	1.0	80

1.2 试验设计

在长沙理工大学云塘校区水利试验中心楼顶搭建通风透明大棚。将 6 类挺水植物分别栽种在 4 类不同氮浓度污水中,每盆种植 5 株,即 24 组。各设 3 组平行样,即 72 组。对照组各有 3 组平行样,即 12 组,共计 84 组。盆栽花盆开口直径 18.5 cm,高 14.0 cm,底部内径 12.5 cm。用除氯后的自来水水培两周后,清理挺水植物枯萎叶片和腐败根系,再将其分别植入 4 类盛有污水的花盆中。每盆污水起始量为 1.68 L。定期使用被太阳曝晒除氯后的自来水补充水分蒸发和植物蒸腾作用所消耗的水分,使水位保持不变。

试验于 2018 年 4 月 29 日开始至 2018 年 6 月 27 日结束,共 60 d。从 2018 年 5 月 5 日开始监测污水总氮、氨氮浓度、pH、DO、水温、气温、过氧化氢酶活性和根系活力。同时,测量并记录植物株高、根系的粗细和长度。每 7 d 同时监测一次污水总氮、氨氮浓度。水样采集时用注射器抽取水面以下 3 cm 处的水样,每次取样 30 mL,整个试验过程共取样 8 次。在试验开始以及试验结束后,取植物根茎测定过氧化氢酶活性和根系活力^[14]。用温度计每天监测大棚内的室温和盆内水温。

1.3 水样及植物测定方法

水样检测方法参考《水和废水检测分析方法》^[15],总氮采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,氨氮采用纳氏试剂分光光度法测定,pH 采用 pH 检测仪测定,DO 采用溶解氧测定仪测定。

植物株高和茎粗采用细绳测量,株高测量从根茎开始至植物叶片最顶端结束,茎粗测量植物最粗根茎。每次测量同一棵植株,最终采用平均值。植物根系活力采用 TTC 法测定,过氧化氢酶活性采用植物过氧化氢酶试剂盒测试^[16-17]。

1.4 数据处理和表达

1) 平均去除率和累计去除率。对每组试验的 3 组平行试验结果取平均值,计算平均去除率,再依次计算第 i 天的累计去除率。本研究所提及的氨氮和总氮综合去除率和净去除率均为不同时间段的累计平均去除率。

2) 综合去除率和植物净去除率。将一盆盆栽视为一个系统,该系统包括植物、水体基质和微生物等。综合去除率指一个系统对污水总氮和氨氮的去除率;植物净去除率指植物对污水总氮和氨氮的去除率,在此将其近似表示为综合去除率扣除对照组后的去除率。综合去除率和植物净去除率也以 3 组平行试验结果的平均值来表示。

本研究的试验数据采用 Excel 2019、SPSS 软件进行统计分析。

2 试验结果

2.1 各类植物氮素去除率随时间的变化特征

各类挺水植物对 4 类污水中总氮和氨氮去除率的变化过程见图 1~2。总体上,各类植物对各类污水中总氮和氨氮净化过程的变化趋势和特征基本相似,整体表现为早期净化效率快速升高,中后期升高趋势变缓。具体看,前 14 d,氨氮和总氮的累计去除率快速升高;到第 21 天,升高速率减缓;到第 28 天,部分出现一定程度的反弹,此后振荡升高直至基本稳定。在 $\alpha=0.05$ 的显著性水平下,不同植物的氮素去除能力具有极显著的差异($\gamma<0.01$)(表 2)。

表 2 不同试验组不同植物去除氮素的差异性分析
Table 2 Difference analysis of nitrogen removal of
different plants in different experimental groups

污染物	试验组	γ	γ_α	显著程度
总氮	T_1	2.02E-17	0.01	极显著
	T_2	3.43E-25	0.01	极显著
	T_3	8.40E-28	0.01	极显著
	T_4	1.27E-25	0.01	极显著
氨氮	T_1	1.46E-23	0.01	极显著
	T_2	9.90E-31	0.01	极显著
	T_3	1.03E-37	0.01	极显著
	T_4	5.08E-32	0.01	极显著

注:此表所列为单因素方差分析结果,显著性水平 $\alpha=0.05$ 。

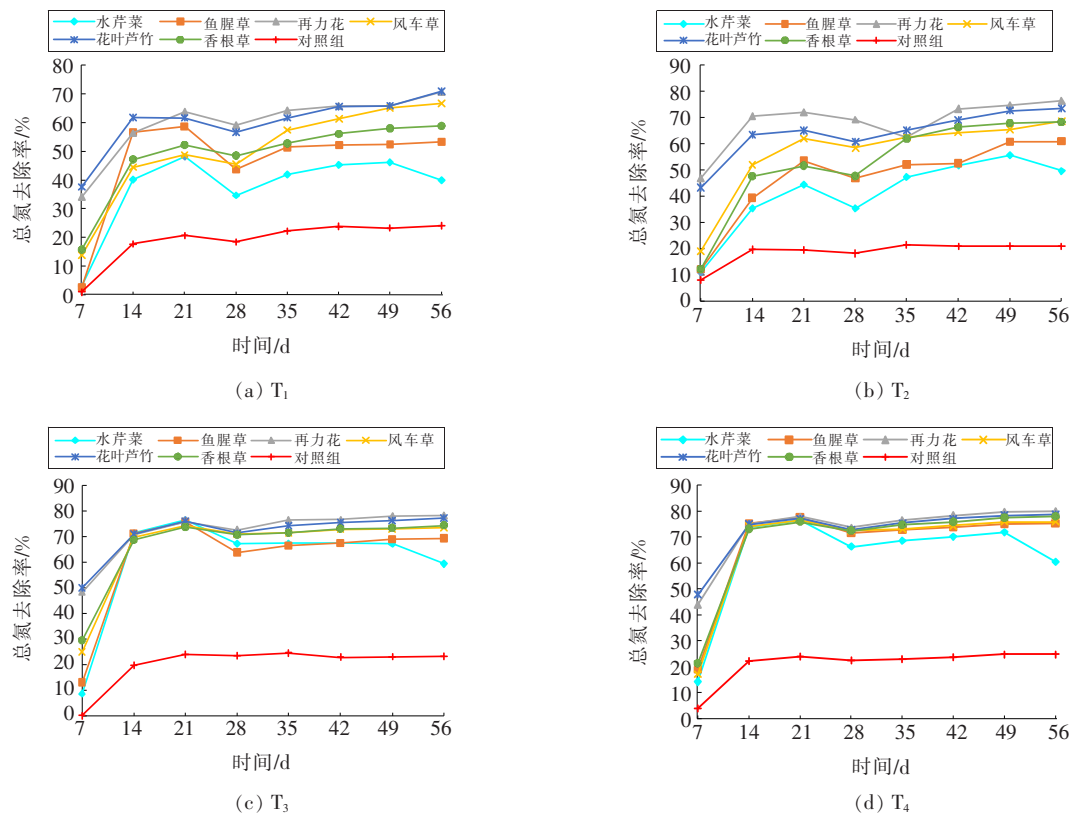


图 1 总氮去除率随时间的变化

Fig. 1 Change of removal rate of total nitrogen with time

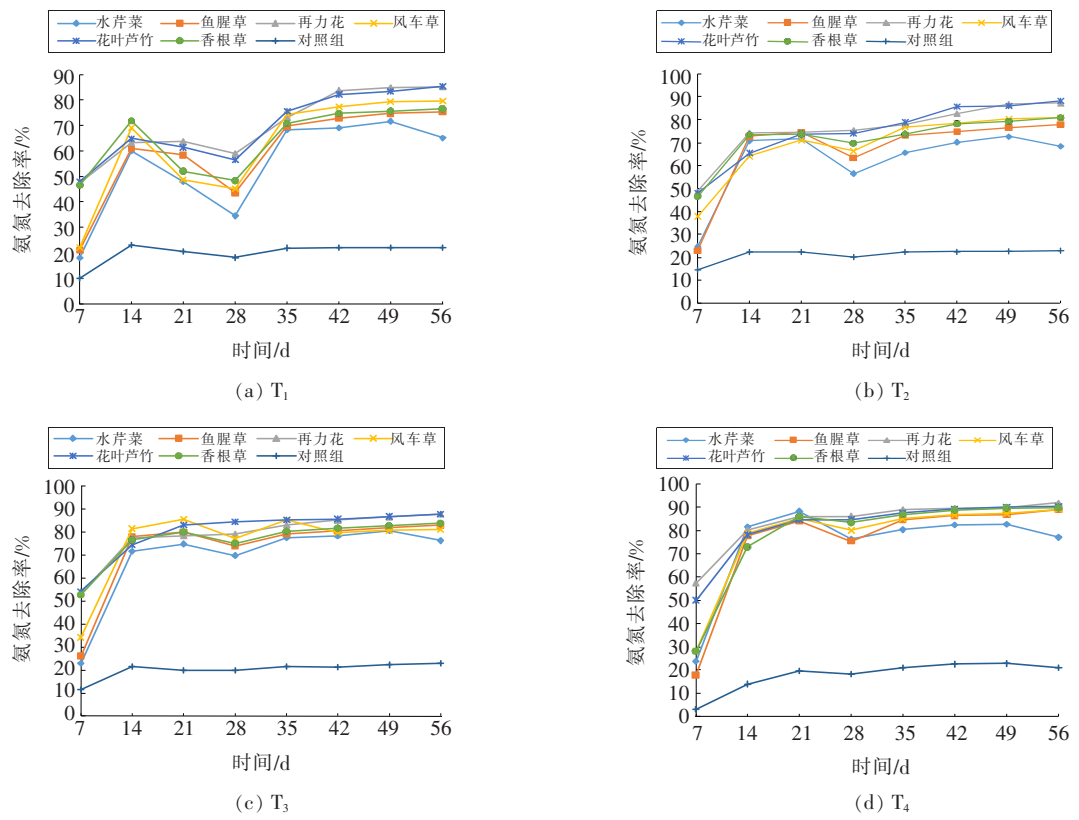


图 2 氨氮去除率随时间的变化

Fig. 2 Change of removal rate of ammonia nitrogen with time

2.1.1 总氮去除率随时间的变化特征

1) 试验前 7 d,4 类污水的盆栽系统中,水芹菜、鱼腥草、风车草和香根草的总氮累计去除率较低,其累计综合去除率和植物净去除率分别为 2.55%~29.46%和 1.78%~29.35%。特别是水芹菜和鱼腥草,其累计综合去除率和净去除率分别低于 20.00%和 15.00%。再力花和花叶芦竹的总氮累计去除率相对较高,其累计综合去除率和净去除率很快就达到了 33.98%~49.95%和 33.21%~49.84%。

2) 到第 14 天,水芹菜、鱼腥草、风车草和香根草的总氮累计去除率快速升高,其累计综合去除率和净去除率快速升高至 39.93%~75.16%和 22.37%~53.08%,最大升幅达 62.00%和 43.00%。再力花和花叶芦竹的总氮累计去除率的升幅相对较小,两者的累计综合去除率和净去除率的升幅分别小于 30.00%和 10.00%。

3) 到第 21 天,各类植物的总氮累计去除率均有所降低,与第 14 天相比,各类植物的累计综合去除率和净去除率的升幅仅为 0.30%~9.00%和 0.10%~9.00%,大部分升幅不到 5.00%。

4) 到第 28 天,除再力花和花叶芦竹外,其他 4 类植物的总氮去除率均有所下降,下降幅度大多为 2.00%~8.00%,最大下降幅度达 15.00%。再力花和花叶芦竹的总氮去除率微弱升高,其综合去除率和净去除率的升高幅度基本低于 1.00%和 1.50%。第 28 天后,各类植物的总氮去除率先小幅升高,最后基本达到稳定。

2.1.2 氨氮去除率随时间的变化特征

1) 试验前 7 d,4 类污水的盆栽系统中,水芹菜、鱼腥草和风车草的氨氮去除率较低,其综合去除率和净去除率仅为 17.80%~37.77%和 8.10%~25.00%。特别是水芹菜和鱼腥草,其综合去除率和净去除率分别低于 25.00%和 20.00%。再力花和花叶芦竹的氨氮去除率较高,其综合去除率和净去除率很快就达到了 47.50%~57.4%和 33.50%~54.30%。当氨氮浓度≤5.00 mg/L 时,香根草的综合去除率和净去除率均较高,分别为 46.50%~52.80%和 31.90%~41.20%;而当氨氮浓度增大至 15.00 mg/L 时,其综合去除率和净去除率仅为 28.00%和 24.80%。

2) 到第 14 天,水芹菜、鱼腥草和风车草的氨氮去除率快速升高,其综合去除率和净去除率达到了 60.10%~81.60%和 37.00%~67.60%,最大升高幅度达 58.00%和 47.00%。其他 3 类植物的氨氮去除率上升幅度相对较小,综合去除率和净去除率的升高幅度基本低于 28.00%和 20.00%。

3) 到第 21 天,各类植物的氨氮去除率均有所降低,与第 14 天相比,大部分植物的氨氮综合去除率和净去除率才升高了不到 5.00%,最大升幅也仅有 14.00%。

4) 到第 28 天,除再力花和花叶芦竹外,其他 4 类植物的氨氮去除率均有所下降,下降幅度大多为 2.00%~8.00%,最大下降幅度达 15.10%。再力花和花叶芦竹的氨氮去除率微弱升高,其综合去除率和净去除率的升高幅度基本低于 2.00%和 3.00%。第 28 天后,各类植物的氨氮去除率先小幅升高,最后基本达到稳定。

2.2 各类植物净化污水氮素效果的比较

分别以试验结束后的最终综合去除率和植物净去除率对比分析各类植物对不同浓度污水氮素的净化效果。

2.2.1 对总氮净化效果的比较

将各类植物对 4 类污水的总氮综合去除率和净去除率列于表 3。从表 3 可以看出,再力花和花叶芦竹对总氮的去除效果最好,两者对 4 类污水的总氮综合去除率和净去除率分别达到了 70.00%和 45.00%以上。水芹菜的总氮综合去除率和净去除率均最低,仅为 39.83%~60.34%和 15.92%~35.62%。其他 3 类植物净化总氮的能力高于水芹菜,低于再力花和花叶芦竹。

随着污水浓度由 1.50 mg/L 升高至 25.00 mg/L,各类植物的总氮综合去除率和净去除率基本上都出现了不同程度的上升。当污水浓度≤2.00 mg/L 时,水芹菜、鱼腥草和香根草的总氮综合去除率和净去除率大部分低于 70.00%和 50.00%;而当污水浓度≥15.00 mg/L 时,三者的除氮效果均有较明显的改善。再力花和花叶芦竹对低浓度和高浓度污水均表现出较好的净化效果,再力花和花叶芦竹的总氮综合去除率最高,分别达到了 79.99%和 78.65%,净去除率也最高,分别达到了 55.39%和 53.93%。

表 3 各类植物对不同浓度污水总氮的去除效果

Table 3		Removal effects of different plants on total nitrogen in sewage with different concentrations						%
评价指标	试验组	水芹菜	鱼腥草	再力花	风车草	花叶芦竹	香根草	
综合去除率	T ₁	39.83	53.13	70.55	66.46	70.72	58.71	
	T ₂	49.63	60.85	76.25	68.47	73.46	68.17	
	T ₃	59.38	69.27	78.13	73.41	77.09	74.39	
	T ₄	60.34	75.30	79.99	75.94	78.65	77.92	
净去除率	T ₁	15.92	29.22	46.64	42.55	46.81	34.80	
	T ₂	28.77	39.99	55.39	47.61	52.60	47.31	
	T ₃	36.16	46.05	54.91	50.19	53.87	51.17	
	T ₄	35.62	50.58	55.27	51.22	53.93	53.20	

2.2.2 对氨氮净化效果的比较

将各类植物对 4 类污水的氨氮综合去除率和净去除率列于表 4。从表 4 可以看出,与植物对污水总氮的去除情况相似,依然是再力花和花叶芦竹对氨氮的去除效果最好,两者对 4 类污水的氨氮综合去除率和净去除率分别达到了 85.00%和 63.00%以上。水芹菜的氨氮综合去除率和净去除率均最低,其对 4 类污水的氨氮综合去除率和净去除率仅为 65.23%~77.10%和 43.20%~56.05%。其他 3 类植物净化氨氮的能力高于水芹菜,稍低于再力花和花叶芦竹。

随着污水浓度的升高,各类植物的氨氮去除率基本上呈升高趋势。当污水浓度≤2.00 mg/L 时,仅水芹菜的氨氮去除率明显偏低。当污水浓度升高至 15.00 mg/L 时,相对于污水浓度为 1.50 mg/L 的情况,水芹菜、鱼腥草和香根草的除氮效果明显提高,三者的氨氮综合去除率和净去除率分别提高了 10.00%和 6.50%左右。再力花、风车草和花叶芦竹的氨氮去除率升幅较小,其氨氮综合去除率和净去除率仅分别升高了 2.50%和 1.50%左右。

表 4 各类植物对不同浓度污水氨氮的去除效果

Table 4		Removal effects of different plants on ammonia nitrogen in sewage with different concentrations						%
评价指标	试验组	水芹菜	鱼腥草	再力花	风车草	花叶芦竹	香根草	
综合去除率	T ₁	65.23	75.45	85.17	79.71	85.42	76.58	
	T ₂	68.47	77.88	87.28	80.88	88.30	80.86	
	T ₃	76.31	82.98	87.77	81.24	87.78	83.99	
	T ₄	77.10	88.87	91.78	88.88	90.34	89.69	
净去除率	T ₁	43.20	53.42	63.14	57.68	63.39	54.55	
	T ₂	45.61	55.02	64.42	58.02	65.44	58.00	
	T ₃	53.31	59.98	64.77	58.24	64.78	60.99	
	T ₄	56.05	67.82	70.73	67.83	69.29	68.64	

2.2.3 总氮和氨氮去除率的比较

试验结束时,各类植物盆栽系统对总氮的净化效果均低于对氨氮的净化效果。各类植物对总

氮的综合去除率比对氨氮的综合去除率低 11.77%~16.76%;对总氮的净去除率比对氨氮的净去除率低 15.36%~20.43%。其中,水芹菜

的差别最大,再力花和花叶芦竹的差别最小。

2.3 各类植物对污水调节能力的比较

2.3.1 对污水 pH 调节能力的比较

研究表明,当湿地水体 pH>6.00 时,水体环境较友好。当 pH<8.50 时,由氨氮挥发导致的氮浓度下降可以忽略不计,此时,微生物最适宜生长。硝化菌和反硝化菌的最佳 pH 范围为 7.00~8.60^[18]。因此,挺水植物对污水 pH 的调节能力在一定程度上将影响其净化污水的效果。图 3 所示为各类植物在去除不同浓度污水氮素的过程中水体 pH 的变化情况。从图 3 可以看出,6 类挺水植物盆栽系统中污水 pH 随时间的延长而下降,

以试验第 7~14 天下降速度最快。到试验结束时,各组试验污水基本由弱碱性变为中性,降幅为 5.00%~12.00%。相对于对照组,各组试验污水的 pH 下降了 0.11~0.77,其中,再力花盆栽中污水的 pH 下降幅度最大,达到了 0.45~0.77。

按照污水浓度从小到大排列,各类植物盆栽系统中污水的最终 pH 的范围依次为 7.35~7.69、7.07~7.66、7.21~7.45 和 7.12~7.43。对不同浓度污水最终的 pH 进行分析,发现当显著性水平 $\alpha=0.05$ 时, $\gamma=0.664>0.05$,没有显著的差异性,说明污水浓度大小与其 pH 之间的相关性不显著。

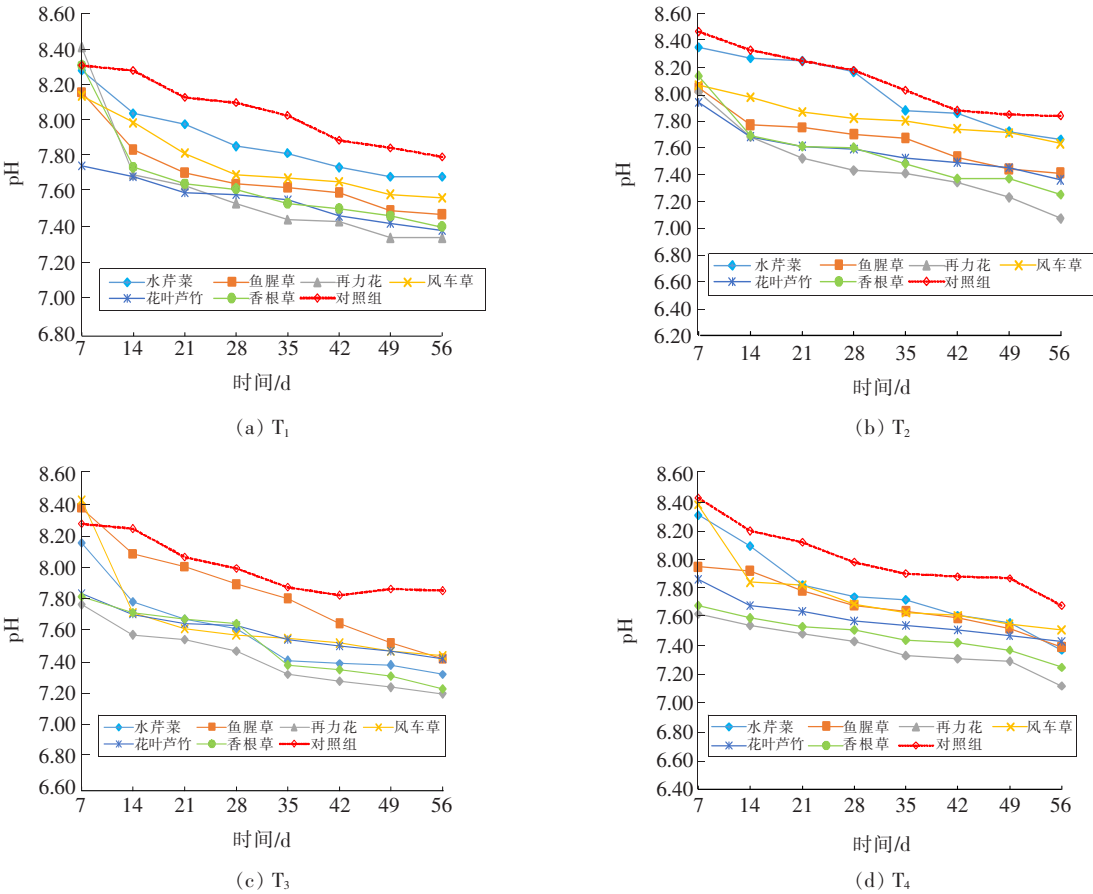


图 3 去除不同浓度污水氮素过程中水体 pH 变化情况

Fig. 3 Change of pH in removal process of nitrogen in sewage with different concentrations

2.3.2 对污水中 DO 调节能力的比较

图 4 所示为各类植物在去除不同浓度污水氮素的过程中水体 DO 的变化情况。从图 4 可以看出,在不同污水浓度下水体 DO 含量均随时间振荡上升。在试验第 21~28 天,DO 含量出现不同程度的下降;在试验第 52~56 天,水芹菜盆栽系统

污水中 DO 含量轻微下降。再力花和花叶芦竹盆栽系统污水中 DO 含量最高,分别保持在 10.27~10.41 和 10.11~11.28 mg/L。相同情况下对照组 DO 含量仅有 4.97~5.95 mg/L。说明再力花和花叶芦竹对污水中 DO 的调节能力较好。

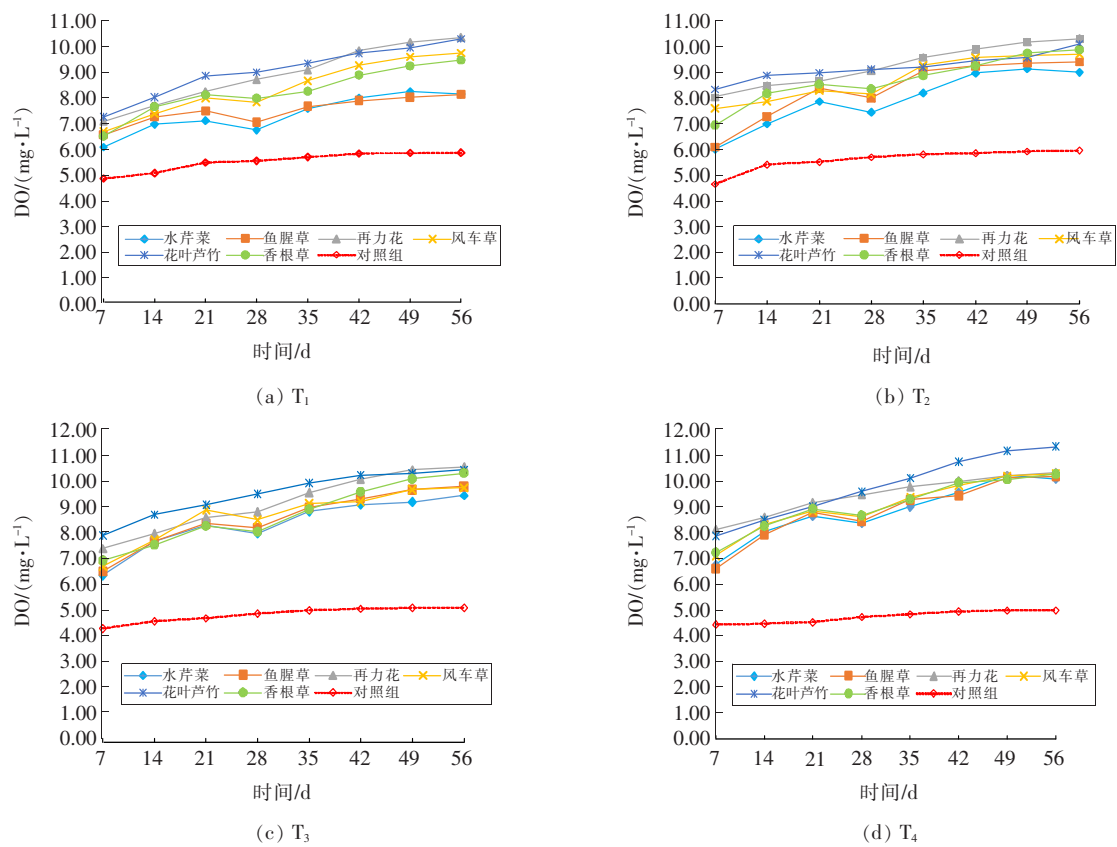


图 4 去除不同浓度污水氮素过程中水体 DO 的变化情况

Fig. 4 Change of DO in removal process of nitrogen in sewage with different concentrations

3 讨论

3.1 挺水植物去除污水总氮和氨氮的影响因素分析

有研究表明,植物的氮积累量与氮的浓度有显著的线性关系^[19],说明植物的氮积累量与氮的浓度存在一定的相关性。试验结果显示,各类植物对氮素的净化效果随污水浓度的升高均呈现增大趋势,说明在试验设定的氮素浓度范围内,各类植物对污水氮素负荷表现出了较好的抗逆性,氮素含量相对较高的污水更有利于植物生长。对于 4 类污水,仅水芹菜的过氧化氢酶活性随着污水浓度的升高轻微减弱,说明水芹菜对高浓度氮素污水的适应能力相对较弱,这也是其对氮素的去除效果相对较差的原因。

试验选择在春夏之交进行,此时节气温升高明显。试验时段内气温和水温分别为 24~39 ℃ 和 17~34 ℃(见表 5)。试验结果显示,植物对氮素的去除效率与温度之间表现出较明显的相关

性,随着温度的稳定上升,综合去除率快速攀升。在试验第 21~28 天时,温度有所下降,各类植物对氮素的去除效率也有所下降。这是因为植物生长和微生物活动受到温度波动的影响,从而影响了去除效果。试验后期,挺水植物生长放缓,对总氮和氨氮的去除效率随着时间的延长,在持续的高温下基本趋于稳定。但在试验第 51~56 天,水芹菜对氮素的去除率出现了一定程度的下降,可能是试验后期温度较高而水芹菜不耐热导致的。

表 5 试验时段气温和水温的监测结果

Table 5 Monitoring results of air temperature and water temperature during the test period		℃							
监测		监测时间/d							
项目		7	14	21	28	35	42	49	56
气温		27	30	33	25	37	38	39	38
水温		18	22	26	17	31	33	34	34

试验综合过氧化氢酶活性、根系活力以及植物株高、茎粗和根系长度来评价植物的生长状况。

植物对氮素的需求之一是通过消耗水体中的

氮使自身的茎快速生长^[13,20],因此植物对氮的净化效果与植物生物量和生长周期正相关。对比发现,花叶芦竹和再力花生物量较大,根系活力和过氧化氢酶活性较强,对氨氮和总氮的去除率最高,DO含量也较其他植物更高。水芹菜生物量小,代谢活力弱,因此对氮素的去除效率较低,去除效果不稳定,同时DO含量最低。整体来看,植物对水体pH的调节能力与污水浓度的大小无显著关联。有研究表明,植物的氮素积累量与生物量呈较强的正相关关系^[20-21],本研究的试验结果也显示出这一规律。

3.2 挺水植物去除污水总氮和氨氮的机理分析

分析对照组总氮和氨氮浓度随时间和温度的变化过程,可以认为氮沉降和微生物降解对去除水体中的氮素起到了一定的作用。试验初期,对照组水体中氮浓度明显下降,中后期氮浓度变化基本趋于稳定。可以认为,早期水体氮的去除主要是由于沉降,而后期是由于微生物的降解和吸附作用,这一过程较为缓慢,去除速度也会因此放缓^[6]。

在试验初期,各类植物氮素综合去除率和净去除率上升迅速,到试验中后期去除率上升速度放缓,这应该是由早期植物生长需要营养物质,因而植物通过吸收氮素来提供生长所需要的能量。植物在不同时期对氮素的需求量有一定的差异^[22-23]。各类植物试验前后株高、茎粗和根系长度的变化情况显示,水芹菜生长状况较差,生物量较小;再力花生物量较大,长势一般;花叶芦竹生物量大,长势较好。尤其对于总氮,试验中后期植物生长速度放缓,同时吸收能力达到饱和,去除率上升速度放缓,去除率最终受到植物吸收能力的制约。

湿地植物主要通过根系硝化与反硝化作用去除污水中的氨氮^[24]。氨氮在水中多呈离子状态,通过阳离子交换吸附作用被植物吸收。植物吸收的氮素仅占污水中氮素总含量的5.00%~10.00%,植物干重含氮量仅有15~32 mg/g,因而其对氮素的去除作用有限。植物发达的根系能够为微生物生长提供适宜的环境,促进硝化和反硝化作用的进行,进而对脱氮过程起到促进作用^[25-26]。试验结束后,除水芹菜外,其余5类植物的过氧化氢酶活性均有所增强,但6类植物根系活力均出现不同程度的增强。其中,再力花、花叶芦竹和香根草的

过氧化氢酶活性增强最明显,分别达到了7.29%~14.74%、7.96%~14.73%和9.67%~12.07%,根系活力分别增大了69.30%~159.83%、84.63%~177.80%和69.30%~159.53%^[15]。

综合试验结果可以发现,植物生物量越大,植物脱氮效果越好。试验中花叶芦竹和再力花生物量较大,根系活力、过氧化氢酶活性较强^[15],对氨氮和总氮的去除率最高;水芹菜生物量小,代谢活力弱,因此对氮素的去除效率较低,去除效果不稳定。

挺水植物的根毛输氧传递特性能使根系附近长期处于好氧-缺氧-厌氧状态,促进根系硝化和反硝化连续交替进行,提高湿地脱氮效率。有研究表明,植物对氮的去除作用主要通过根系的硝化作用进行,有氧区和厌氧区的硝化细菌和反硝化细菌对氮的去除贡献率高达80%^[27-28]。

4类污水浓度下,各类挺水植物总氮综合去除率为70.72%~79.99%,比总氮净去除率高23.91%~25.08%;氨氮综合去除率为80.88%~91.78%,比氨氮净去除率高28.39%~10.15%。说明除了挺水植物的作用外,水体中的藻类和微生物也起到了一定的作用^[29]。温度对植物净化氮素的影响分析表明,在试验阶段的温度范围内,温度高低会影响植物生长和微生物活性,从而影响氮的去除效果。

各类植物对总氮的去除效率明显低于对氨氮的去除效率,说明盆栽系统中的氨氮通过硝化作用发生了向亚硝态氮和硝态氮的转化。从DO的监测结果来看,花叶芦竹和再力花的DO含量较其他植物更高,水芹菜DO含量最低。试验过程中,尽管DO含量有起伏变化,但水体环境基本处于氧化环境。氧化环境有利于好氧微生物的生长代谢,从而促进好氧微生物对氨氮的利用。

4 结论

1) 在试验前14 d,污水氮素累计平均去除率快速升高,到第21天升高速率减缓,到第28天部分出现反弹,此后振荡升高至基本稳定。挺水植物对4类污水氨氮和总氮累计平均综合去除率分别为77.10%~91.78%和60.34%~79.99%,净去除率分别为35.62%~55.27%和56.05%~70.73%。

2) 随着污水浓度由 1.50 mg/L 升高至 25.00 mg/L,各类植物氮素累计平均综合去除率和净去除率出现不同程度的上升。低浓度下,再力花和花叶芦竹的氮素综合去除率和净去除率最高。各类植物总氮的综合去除率比氨氮的综合去除率低 11.77%~16.76%;总氮的净去除率比对氨氮的净去除率低 15.36%~20.43%。其中,水芹菜的差别最大,再力花和花叶芦竹的差别最小。监测结果显示,植物代谢能力和生长趋势与植物除氮能力呈正相关关系。

3) 各组试验污水基本由弱碱性变为中性,再力花盆栽中污水的 pH 下降幅度最大,污水浓度大小与 pH 变化的相关性不明显。6 类植物去除不同浓度污水氮素过程中水体的 DO 含量有一定程度的起伏变化,但水体环境基本为氧化环境。

4) 综合各类植物对污水的除氮效果及稳定性,以及对环境温度的敏感程度,同时考虑植物本身的特性和观赏性,认为再力花和花叶芦竹更适合作为我国南方湿地系统除氮挺水植物的选种和配置。

〔参考文献〕

- [1] 黄勇,董运常,罗伟聪,等. 人工湿地基质类型及其去污能力的影响因素[J]. 贵州农业科学,2018,46(1): 137-142.
HUANG Yong, DONG Yun-chang, LUO Wei-cong, et al. Influencing factors of substrate types of constructed wetland and their decontamination ability [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2018, 46(1): 137-142.
- [2] 王雨轩,魏巍,李萍萍,等. 人工湿地微生物的研究进展[J]. 生物技术通报,2017,33(10):74-79.
WANG Yu-xuan, WEI Wei, LI Ping-ping, et al. Study progress on microorganisms in constructed wetlands [J]. Biotechnology Bulletin, 2017, 33(10): 74-79.
- [3] 吴英海,韩蕊,张翠雅. 人工湿地构造及生物因素研究进展[J]. 化工环保,2021,41(1):1-8.
WU Ying-hai, HAN Rui, ZHANG Cui-ya. Research progress on constructed wetland structure and biological factors [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2021, 41(1): 1-8.
- [4] 王海燕,赵远哲,王文富,等. 人工湿地脱氮影响因素及强化措施研究进展[J]. 环境工程技术学报,2020, 10(4):585-597.
- WANG Hai-yan, ZHAO Yuan-zhe, WANG Wen-fu, et al. A review of influencing factors and enhanced measures for nitrogen removal of constructed wetlands [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2020, 10(4): 585-597.
- [5] 潘福霞,来晓双,李欣,等. 不同湿地植物脱氮效果与根际土壤微生物群落功能多样性特征分析[J]. 环境科学研究,2020,33(6):1 497-1 503.
PAN Fu-xia, LAI Xiao-shuang, LI Xin, et al. Nitrogen removal efficiencies and rhizosphere soil microbial community functional diversities of different plants in constructed wetlands[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(6): 1 497-1 503.
- [6] 李梅姿,刘正富,吴航航,等. 杂交水芹菜与几种水生挺水植物对养猪污水净化效果比较[J]. 浙江农业科学,2019,60(2):300-301,306.
LI Mei-zi, LIU Zheng-fu, WU Hang-hang, et al. Comparison of the effects of hybrid cress and several aquatic emergent plants on pig wastewater purification [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2019, 60(2): 300-301, 306.
- [7] 孙瑞莲,刘健. 3 种挺水植物对污水的净化效果及生理响应[J]. 生态环境学报,2018,27(5):926-932.
SUN Rui-lian, LIU Jian. Physiological response of emergent hydrophytes to wastewater stress and their potential for reducing COD and nutrients [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(5): 926-932.
- [8] 毛雪慧,易科浪. 人工湿地对危险废物处理站尾水处理效果评价[J]. 中国农村水利水电,2020(3):83-86, 90.
MAO Xue-hui, YI Ke-lang. Evaluation of the effect of constructed wetland on tail water treatment of hazardous waste [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(3): 83-86, 90.
- [9] 冯优,陈庆锋,李金业,等. 水生植物对不同氮磷水平养殖尾水的综合净化能力比较[J]. 农业环境科学学报,2020,39(10):2 397-2 408.
FENG You, CHEN Qing-feng, LI Jin-ye, et al. Comparison of purification ability of aquatic plants under different concentrations of nitrogen and phosphorus in tailrace of livestock wastewater [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(10): 2 397-2 408.
- [10] 罗虹. 沉水植物、挺水植物、滤食性动物对富营养化淡水生态系统的修复效果研究[D]. 上海:华东师范大学,2009.

- LUO Hong. The study of the restoration effectiveness by submerged plants, emergent plants & plankton feeders in eutrophicated fresh water ecosystems[D]. Shanghai: East China Normal University, 2009.
- [11] 徐冰石, 袁小兰, 张绿水, 等. 寻乌废弃稀土矿区人工湿地4种植物净化水体氮的效果[J]. 江西农业大学学报, 2021, 43(2): 459-468.
- XU Bing-shi, YUAN Xiao-lan, ZHANG Lyu-shui, et al. Nitrogen purification effects of four plants grown in the constructed wetland in abandoned rare earth mining areas in Xunwu County, Jiangxi Province[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2021, 43(2): 459-468.
- [12] 梅瑜, 姚振锋, 陈金峰, 等. 三种水生植物对人工养殖污水中主要污染物的影响[J]. 广州环境科学, 2013, 28(2): 7-10.
- MEI Yu, YAO Zhen-feng, CHEN Jin-feng, et al. Effects of three aquatic plants on the change of main pollutants in aquaculture-like wastewater[J]. Guangzhou Environmental Science, 2013, 28(2): 7-10.
- [13] 袁杰, 董立新, 杨洁, 等. 六种挺水植物对富营养化河水氮磷净化效果研究[J]. 环境科学与管理, 2017, 42(4): 75-78, 83.
- YUAN Jie, DONG Li-xin, YANG Jie, et al. Study on purification effect of nitrogen and phosphorus in eutrophic river water by six emerged plants[J]. Environmental Science and Management, 2017, 42(4): 75-78, 83.
- [14] 湛宏伟, 蔡雪璨, 杨欣怡, 等. 南方挺水植物净化城镇污水总磷的对比试验[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(S2): 95-100.
- CHEN Hong-wei, CAI Xue-can, YANG Xin-yi, et al. Comparatively experimental study on removal of total phosphorus from sewages by emergent hydrophytes in South China[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(S2): 95-100.
- [15] 宋思铭. 哈尔滨市中小河流河岸缓冲带挺水植物筛选研究[J]. 水利科技与经济, 2018, 24(10): 47-53.
- SONG Si-ming. Study on the selection of emergent plants in the buffer zone of the middle and small rivers in Harbin[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2018, 24(10): 47-53.
- [16] 张倩文. 强化型生态浮岛净化受污染水体的效能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- ZHANG Qian-wen. Research on efficacy of enhanced ecological floating wetland in purifying contaminated water[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [17] JIANG X Y, TIAN Y F, JI X Y, et al. Influences of plant species and radial oxygen loss on nitrous oxide fluxes in constructed wetlands[J]. Ecological Engineering, 2020, 142: 105644.
- [18] 李勇, 王文鹏, 刘静. 人工湿地脱氮除磷影响因素及改进措施研究[J]. 湿地科学与管理, 2018, 14(1): 56-59.
- LI Yong, WANG Wen-peng, LIU Jing. Influence factors and improvement measures for nitrogen and phosphorus removal in artificial wetland[J]. Wetland Science and Management, 2018, 14(1): 56-59.
- [19] 张芳, 易能, 邸攀攀, 等. 不同水生植物的除氮效率及对生物脱氮过程的调节作用[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(2): 174-180.
- ZHANG Fang, YI Neng, DI Pan-pan, et al. Nitrogen removal efficiency and control of bio-denitrification process of aquatic plants[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2017, 33(2): 174-180.
- [20] 盛丰, 文鼎, 欧阳琦, 等. 微生物生长繁殖条件下土壤污染物的输移降解模型[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2020, 17(1): 83-91.
- SHENG Feng, WEN Ding, OUYANG Qi, et al. Modeling the migration and degradation of soil contaminants by considering microbe propagation[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology(Natural Science), 2020, 17(1): 83-91.
- [21] 刘文杰, 许兴原, 何欢, 等. 4种湿地植物对人工湿地净化生活污水的影响比较[J]. 环境工程学报, 2016, 10(11): 6 313-6 319.
- LIU Wen-jie, XU Xing-yuan, HE Huan, et al. Comparison of treatment performances of simulated urban sewage in constructed wetlands planted with four types of wetland plant[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(11): 6 313-6 319.
- [22] 汪文强, 王子芳, 高明. 5种水生植物的脱氮除磷效果及其对水体胞外酶活的影响[J]. 环境工程学报, 2016, 10(10): 5 440-5 446.
- WANG Wen-qiang, WANG Zi-fang, GAO Ming. Efficiency of removing nitrogen and phosphorus and effects on extracellular enzyme activity in water body by five hydrophytes[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(10): 5 440-5 446.

(下转至第114页)