

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2024.04.029

李哲, 王巧红, 郑子成, 等. 4 种蓼属植物对模拟生活污水的脱氮除磷效果[J]. 水土保持学报, 2024, 38(4): 362-370.

LI Zhe, WANG Qiaohong, ZHENG Zicheng, et al. Effects of four species of *Polygonum* on nitrogen and phosphorus removal from simulated domestic sewage[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 362-370.

4 种蓼属植物对模拟生活污水的脱氮除磷效果

李哲¹, 王巧红², 郑子成¹, 李廷轩¹

(1. 四川农业大学资源学院, 成都 611130; 2. 四川水利职业技术学院, 成都 611231)

摘要: [目的] 为探明蓼属植物的净水能力, 以期明晰蓼属植物应用于生活污水修复的可行性。[方法] 选取水蓼(*Polygonum hydropiper*)、红蓼(*Polygonum orientale*)、叉分蓼(*Polygonum divaricatum*)、酸模叶蓼(*Polygonum lapathifolium*)为研究对象, 通过模拟水培试验, 探讨 4 种蓼属植物对 2 种浓度生活污水中总氮(TN)、铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、总磷(TP)的去除效果及蓼属植物对污水中氮磷的积累能力。[结果] (1) 4 种蓼属植物对于 2 种浓度生活污水中的氮磷均有较好的去除效果。(2) 高浓度污水处理下, 红蓼、叉分蓼和酸模叶蓼对 TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TP 的去除率分别为 96.04%~97.41%, 94.60%~97.79% 和 98.78%~99.68% (28 天), 均显著高于水蓼 ($p < 0.05$)。 (3) 低浓度污水处理下, 4 种蓼属植物地上部氮磷积累量分别为 27.38~37.47 mg/plant 和 7.65~10.11 mg/plant, 植物间差异不显著; 高浓度污水处理下, 红蓼氮积累能力较强, 地上部氮积累量达 57.16 mg/plant, 酸模叶蓼磷积累能力较强, 地上部磷积累量达 15.32 mg/plant, 水蓼氮磷积累能力均较弱。[结论] 4 种蓼属植物均可用于修复较低浓度的生活污水, 污水浓度较高时宜选择红蓼、叉分蓼和酸模叶蓼作为修复材料。研究结果为生活污水修复的植物材料选择提供参考。

关键词: 生活污水; 蓼属植物; 氮磷去除; 氮磷积累

中图分类号: X173

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)04-0362-09

Effects of Four Species of *Polygonum* on Nitrogen and Phosphorus Removal from Simulated Domestic Sewage

LI Zhe¹, WANG Qiaohong², ZHENG Zicheng¹, LI Tingxuan¹

(1. College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China;

2. Sichuan Water Conservancy Vocational College, Chengdu 611231, China)

Abstract: [Objective] To investigate the water purification capabilities of *Polygonum* species and assess their suitability for the remediation of domestic sewage. [Methods] *Polygonum hydropiper*, *Polygonum orientale*, *Polygonum divaricatum* and *Polygonum lapathifolium* were selected as the research objects. The removal effects of total nitrogen (TN), ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$), nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^- - \text{N}$), and total phosphorus (TP) in two concentrations of domestic sewage by these four species of *Polygonum* were discussed through a simulated hydroponic experiment. Additionally, the accumulation ability of *Polygonum* species to nitrogen and phosphorus in sewage was examined. [Results] (1) All four species of *Polygonum* exhibited good removal effects on nitrogen and phosphorus in two concentrations of domestic sewage. (2) Under high concentration sewage treatment, the removal rates of TN, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and TP by *Polygonum orientale*, *Polygonum divaricatum* and *Polygonum lapathifolium* were 96.04%~97.41%, 94.60%~97.79% and 98.78%~99.68% (28 days), respectively, which were significantly higher than those of *Polygonum hydropiper* ($p < 0.05$). (3) Under low concentration sewage treatment conditions, the shoot nitrogen and phosphorus accumulation of four species of *Polygonum* were 27.38~37.47 mg/plant and 7.65~

收稿日期: 2024-02-19

修回日期: 2024-03-29

录用日期: 2024-04-08

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-06-06

资助项目: 四川农业大学学科建设双支计划特色创新团队项目 (T202103); 国家自然科学基金项目 (31972499)

第一作者: 李哲 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事污染水体修复研究。E-mail: 1195100487@qq.com

通信作者: 郑子成 (1976—), 男, 教授, 主要从事土壤侵蚀及其环境效应研究。E-mail: zichengzheng@aliyun.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

10.11 mg/plant, respectively, with no significant difference between plants; Under high concentration sewage treatment, *Polygonum orientale* exhibits a strong nitrogen accumulation capability, with shoot nitrogen accumulation reaching 57.16 mg/plant, while *Polygonum lapathifolium* exhibits a strong phosphorus accumulation capability, with shoot phosphorus accumulation reaching 15.32 mg/plant. Conversely, *Polygonum hydropiper* displays weak nitrogen and phosphorus accumulation abilities. [Conclusion] These findings indicate that all four *Polygonum* species can be used to the remediation of low-concentration domestic sewage. Among them, *Polygonum orientale*, *Polygonum divaricatum*, and *Polygonum lapathifolium* are more suitable for treating high-concentration sewage. This study offers valuable insights into selecting plant materials for remediating domestic sewage.

Keywords: domestic sewage; *Polygonum* plants; nitrogen and phosphorus removal; accumulation of nitrogen and phosphorus

Received: 2024-02-19

Revised: 2024-03-29

Accepted: 2024-04-08

Online(www.cnki.net): 2024-06-06

生活污水不合理排放易造成江河湖海的富营养化^[1-3],已成为水体污染的主要来源之一。2023 年,生态环境部《关于进一步推进农村生活污水治理的指导意见》中指出,农村生活污水治理是农村人居环境整治的重要内容,对推进美丽乡村建设具有重要意义^[4]。目前,我国城市生活污水处理率可达 95% 以上,而农村地区每年产生的污水量超过 160 亿 m³,处理率却处于较低水平,因此亟待提升农村生活污水处理效率^[5-6]。

农村生活污水处理技术正逐渐从传统生化处理技术转向生态—自然处理技术^[7]。植物修复技术因其利用绿色植物来转移、容纳或转化污染物,对环境无二次污染风险,备受关注^[8]。目前,用于污水修复的植物主要包括凤眼蓝(*Eichhornia crassipes*)、菖蒲(*Acorus calamus*)、美人蕉(*Canna indica*)、马来眼子菜(*Potamogeton malaianus*)等,这些植物对生活污水中污染物的去除能力强,净化效果较好^[9-12]。苏媛等^[13]研究发现,西伯利亚菖蒲对涝池污染水体净化能力较差;XU 等^[14]研究结果表明,马来眼子菜不仅对高浓度污水中总氮(TN)、总磷(TP)去除率低,植株腐烂还导致污染物浓度增加。凤眼蓝等植物在管理不当时还造成生物入侵等问题^[15],危害生态安全。可见,上述植物的修复效果易受气候、污水浓度、生物入侵等因素影响,严重制约着生活污水的修复效果。筛选本地化、适应能力强、且具有氮磷富集特性的湿地植物,在提升生活污水的治理效率方面显得尤为必要^[16]。

蓼属植物具有耐寒喜湿、分布广泛、生物量大、生

长速度快、适应能力强的特点。前期研究^[17]结果表明,水蓼(*Polygonum hydropiper*)、红蓼(*Polygonum orientale*)、叉分蓼(*Polygonum divaricatum*)和酸模叶蓼(*Polygonum lapathifolium*)对水体中磷素去除能力均较强,且水蓼对养殖废水中 TN、TP 的去除率分别达 87.47% 和 97.63%^[18]。可见,蓼属植物对水体中氮磷去除具有较大潜力,是否可用于生活污水氮磷去除及污染修复,以提升生活污水修复效率?因此,本研究选用水蓼、红蓼、叉分蓼和酸模叶蓼为研究对象,通过模拟生活污水试验,探究 4 种蓼属植物对生活污水的脱氮除磷效果,为生活污水的有效治理提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试植物:水蓼(*Polygonum hydropiper*)、红蓼(*Polygonum orientale*)、叉分蓼(*Polygonum divaricatum*)、酸模叶蓼(*Polygonum lapathifolium*),种子均采自四川农业大学科研园区(都江堰)(103°36′52″E,31°00′34″N)。

1.2 试验设计与处理

污水浓度依据《西南地区农村生活污水处理技术指南》(建村[2010]149 号)^[19]中四川农村生活污水进水水质检测的范围,用氯化铵(NH₄Cl)、硝酸钾(KNO₃)、磷酸二氢钾(KH₂PO₄)、葡萄糖(C₆H₁₂O₆)等,按照不同比例配置 2 种浓度的生活污水,各污染指标实际浓度见表 1。

表 1 不同浓度污水各指标含量

Table 1 Each index content of different concentration sewage

污染程度	pH	电导率/ (μS·cm ⁻¹)	COD/ (mg·L ⁻¹)	TN/ (mg·L ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/ (mg·L ⁻¹)	NO ₃ ⁻ -N/ (mg·L ⁻¹)	TP/ (mg·L ⁻¹)
低浓度(L)	7.83±0.05	488.00±4.00	148.55±21.77	22.35±2.03	12.31±1.21	10.02±1.03	3.01±0.10
高浓度(H)	7.65±0.22	744.67±5.44	218.92±29.99	40.48±2.57	21.54±1.43	18.88±1.12	5.92±0.37

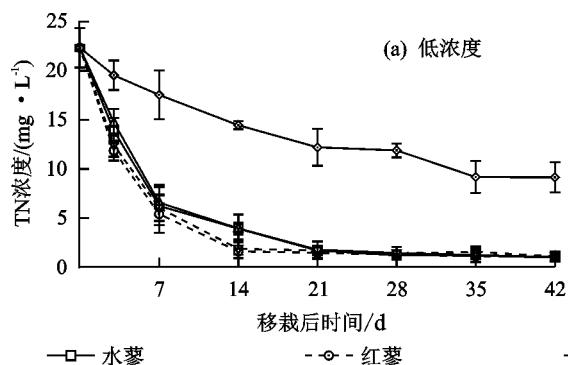
注:表中数据为平均值±标准差。下同。

采用水培试验,选取水蓼、红蓼、叉分蓼、酸模叶蓼作为试验组,以不种植植物作为对照,在水桶中加 5 L 供试污水,每桶 2 株植物,重复 3 次。种子经 10% 的 H_2O_2 消毒,经 30 °C 温水浸泡 6 h 后,播种于盛有蛭石和珍珠岩的漂盘中,种子萌发后进行常规管理,待植物生长到株高为 10 cm 左右,放到相应浓度污水中进行预培养,培养周期为 7 天,随后放入清水中缓苗 3 天,使其经过饥饿处理,缓苗结束后挑选株高、生物量和生长状况等相似的植物作为供试植物。参照霍格兰培养液的标准,向污水中添加适量微量元素贮备液、硫酸镁溶液、钙盐及铁盐溶液,以保证植物的正常生长。试验期间通过加蒸馏水来补充蒸发和植物蒸腾所消耗的水分,用称重法准确补充损失的水量,同时保证其采光、通风条件的一致性。污水样品于植物移栽后 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42 天时进行采集。污水采集时设置 3 个重复,采集水样前,用玻璃棒将水箱内的污水搅拌均匀,随后用注射器在水深 5 cm 处采集水样 40 mL,存于 50 mL 离心管当中,离心管储存至 4 °C 冰箱中保存。植物样品于试验开始和结束时采集,分为地上部和地下部,分别测量株高和根长,后装袋于 105 °C 杀青 0.5 h, 75 °C 烘干至恒重,粉碎后用于测定生物量和氮磷含量。

1.3 测定项目与方法

污水中 TP 的测定方法为过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法; TN 的测定方法为碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的测定方法为靛酚蓝比色法; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的测定方法为紫外分光光度法^[20]。

植物氮含量的测定方法为硫酸—过氧化氢消煮—靛酚蓝比色法; 磷含量测定方法为硫酸—过氧化氢消煮—钼锑抗比色法^[21]。



1.4 数据处理

污水中污染物去除率的计算公式为:

$$\eta = (C_1 Q_1 - C_2 Q_2) / C_1 Q_1 \times 100\% \quad (1)$$

式中: η 为污染水体中氮、磷的去除率(%); C_1 、 C_2 为污水的起始、终止浓度(mg/L); Q_1 、 Q_2 为污水的起始、终止水量(L)。

植物株高根长增长率计算公式为:

$$V = (H_2 - H_1) / H_1 \times 100\% \quad (2)$$

式中: V 为植物株高根长增长率(%); H_1 、 H_2 为试验起始、终止时植物的株高根长(cm)。

植物相对生长速率的计算公式为:

$$\text{RGR} = t^{-1} \ln (W_2 / W_1) \quad (3)$$

式中: W_1 为试验前植物干重(g); W_2 为试验后植物干重(g); t 为试验天数。

采用 SPSS 22.0 软件进行统计分析,选择 LSD 法进行多重比较,显著性水平设置为 $p < 0.05$,采用 Excel 2019、Origin 2023 软件进行图表制作。

2 结果与分析

2.1 蓼属植物对污水中氮的去除效果

2.1.1 污水中 TN 的浓度变化 经过蓼属植物处理的生活污水, TN 浓度在前 14 天内快速下降,随后下降速度逐渐减慢。4 种蓼属植物对于低浓度污水中 TN 的去除率为 95.39%~95.87%,均显著高于对照组($p < 0.05$),4 种蓼属植物处理下, TN 浓度均在第 21 天降低至地表水Ⅲ类水标准(1 mg/L)。高浓度条件下,4 种蓼属植物对于 TN 的去除率达到 97.49%~98.81%,红蓼、叉分蓼和酸模叶蓼在第 28 天将 TN 浓度降低至地表水Ⅲ类水标准,而水蓼则需 35 天(图 1)。

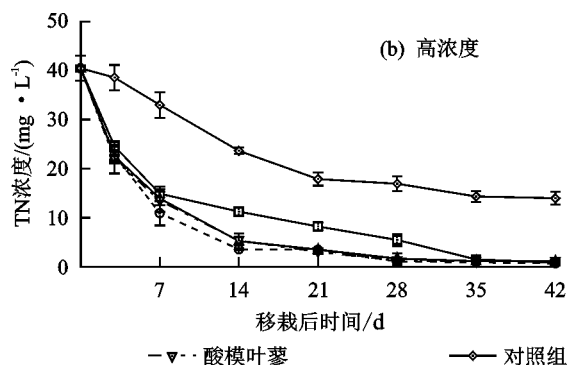


图 1 2 种浓度生活污水中 TN 的浓度变化

Fig. 1 The concentration changes of TN in two different concentrations of domestic sewage

2.1.2 污水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度变化 4 种蓼属植物对污水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果与 TN 类似。4 种蓼属植物对低浓度污水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率为 96.92%~97.39%, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度降低至 0.34~0.40 mg/L, 达到地表水Ⅱ类水水质标准(0.5 mg/L);

高浓度污水中, 经红蓼、叉分蓼和酸模叶蓼处理下污水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在 0~14 天内快速下降, 而水蓼处理下污水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除速度较慢, 试验的第 28 天, 红蓼、叉分蓼和酸模叶蓼处理下污水的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度达到地表水Ⅲ类水标准(1 mg/L), 水蓼处理下

NH_4^+-N 浓度为 4.71 mg/L, 仍高于地表水Ⅲ类水

标准(图2)。

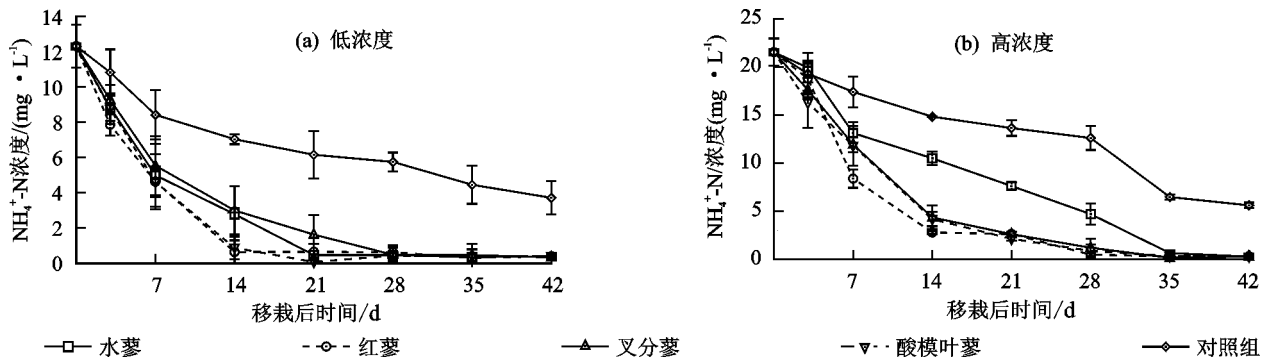


图2 2种浓度生活污水中 NH_4^+-N 的浓度变化

Fig. 2 The concentration changes of NH_4^+-N in two different concentrations of domestic sewage

2.1.3 污水中 NO_3^--N 的浓度变化 4种蓼属植物处理下, 2种浓度污水中 NO_3^--N 浓度均在试验的前7天快速下降, 随后下降速度减慢并逐渐保持稳定的现象, 由于硝化反应促使 NH_4^+-N 转化为

NO_3^--N , 低、高浓度对照组中 NO_3^--N 浓度分别在试验的第35天和第28天出现上升。4种蓼属植物对低、高浓度污水中 NO_3^--N 的去除率分别为93.47%~95.01%和96.21%~99.32%(图3)。

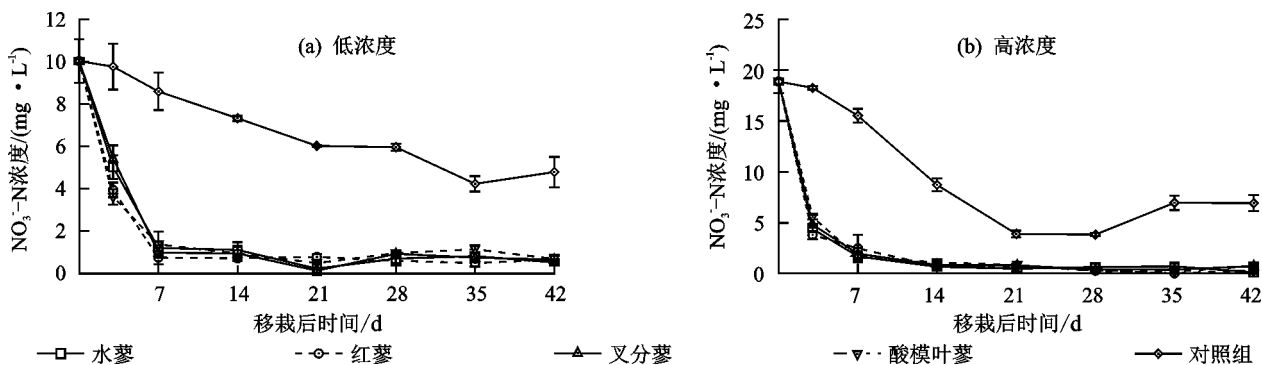


图3 2种浓度生活污水中 NO_3^--N 的浓度变化

Fig. 3 The concentration changes of NO_3^--N in two different concentrations of domestic sewage

2.2 蓼属植物对污水中磷的去除效果

经过4种蓼属植物处理, 低浓度污水中的TP浓度在0~21天快速下降至地表水Ⅲ类水水质标准(0.2 mg/L), 4种蓼属植物对TP的去除率达99.20%~99.78%; 经红蓼、叉分蓼、酸模叶蓼处理的

高浓度污水, 在28天内将污水中TP浓度降低至地表水Ⅲ类水标准, 红蓼、叉分蓼、酸模叶蓼对污水中TP的去除率达99.50%~99.82%, 但水蓼处理下污水中TP的最终浓度为0.55 mg/L, 仍高于地表水Ⅲ类水标准(图4)。

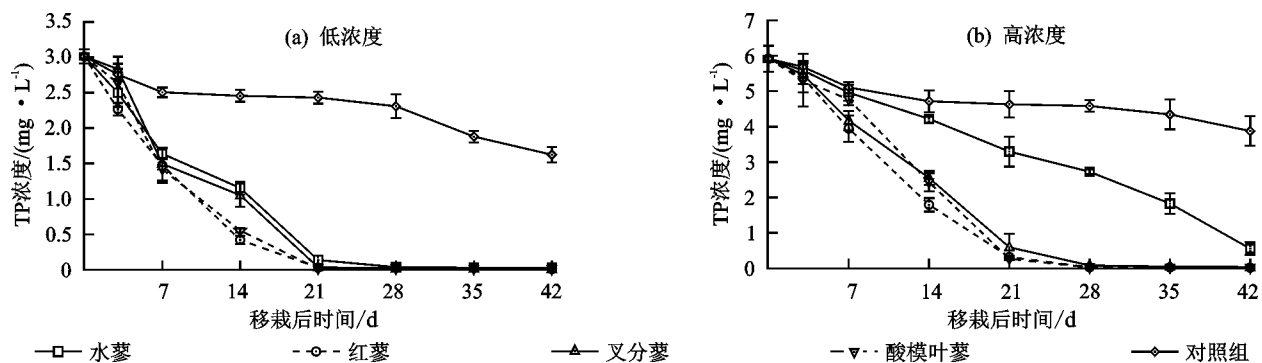


图4 2种浓度生活污水中TP的浓度变化

Fig. 4 The concentration changes of TP in two different concentrations of domestic sewage

2.3 蓼属植物的生长状况

4种蓼属植物在2种浓度生活污水中均能正常生长。试验前中期(21天), 植物生长速度较快, 生物

量变化大, 试验后期(42天), 生物量变化不明显。

4种蓼属植物在低、高浓度污水中的株高增长率分别为34.01%~72.35%和43.76%~101.25%, 在

高浓度污水培养下,酸模叶蓼株高显著高于其他植物($p<0.05$);低浓度污水培养下,4 种蓼属植物根长增长率达 40.93%~119.06%,红蓼和酸模叶蓼的根长显著高于水蓼($p<0.05$),高浓度污水培养下,4 种蓼属植物根长增长率为 37.19%~66.67%,水蓼的根长显著低于酸模叶蓼($p<0.05$)。污水浓度对植物根系发育有显著的影响,随着污水浓度提高,4 种蓼属植物根长均减小($p<0.05$)(表 2)。

表 2 蓼属植物株高和根长变化
Table 2 Changes in plant height and root length of *Polygonum* plants

污染程度	植物	株高			根长		
		试验前/cm	试验后/cm	增长率/%	试验前/cm	试验后/cm	增长率/%
低浓度(L)	水蓼	22.93±2.20a	33.10±5.28ab	44.33	16.90±3.93b	30.34±2.46c*	79.53
	红蓼	21.42±1.13a	28.70±1.25b	34.01	19.23±4.39b	42.13±2.81a*	119.06
	叉分蓼	19.28±1.61a	32.70±2.32ab	69.58	19.98±2.61b	33.40±2.43bc*	67.14
	酸模叶蓼	22.08±3.01a	38.06±5.03a	72.35	26.18±2.46a	36.90±2.22ab*	40.93
高浓度(H)	水蓼	19.87±1.84a	28.56±3.39b	43.76	13.80±1.20b	22.88±2.89b	65.80
	红蓼	18.65±2.08a	29.92±1.11b	60.43	19.58±4.35a	26.87±1.86ab	37.19
	叉分蓼	18.92±1.85a	33.48±2.50b	76.99	18.80±1.99ab	27.48±3.66ab	46.17
	酸模叶蓼	21.27±1.79a	42.80±2.29a	101.25	18.30±2.39ab	30.50±2.38a	66.67

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示同浓度不同植物间差异显著($p<0.05$);上标*表示同一植物不同浓度间差异显著($p<0.05$)。下同。

低浓度污水培养下,4 种蓼属植物地上部生物量无显著差异,酸模叶蓼地下部生物量显著高于水蓼($p<0.05$),水蓼生长速度较慢,地上部、地下部相对生长速率分别为 0.024,0.028,叉分蓼生长速度优势明显,地上部、地下部相对生长速率分别为 0.042,0.052。高浓度污水培养下,水蓼地上部生物量仅为 2.45 g/plant,显著低于红蓼和叉分蓼($p<0.05$),地下部生物量大小表现为酸模叶蓼>叉分蓼≈红蓼>水蓼,4 种蓼属植物地上部相对生长速率为 0.032~0.055,水蓼地下部相对生长速率最低仅为 0.009(表 3)。

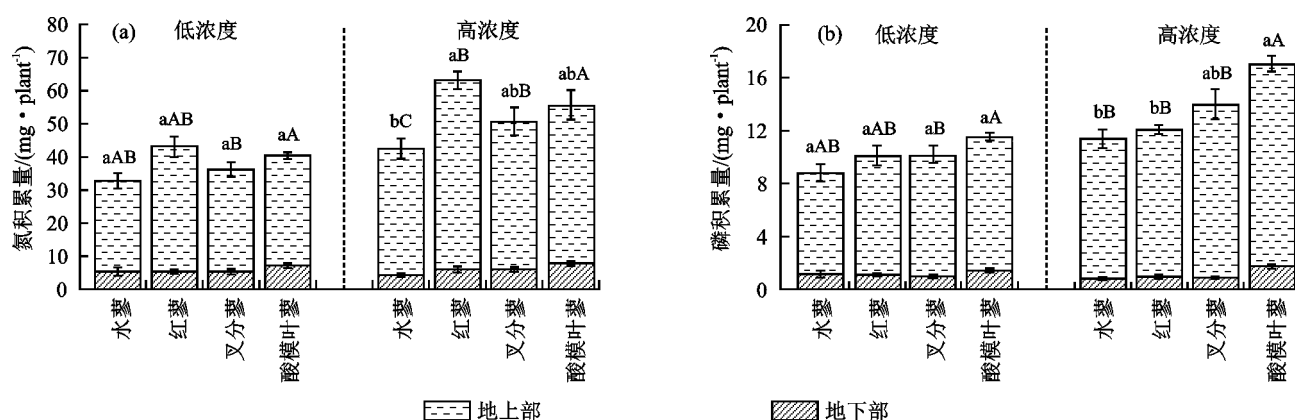
表 3 蓼属植物生物量变化
Table 3 Changes in biomass of *Polygonum* plants

污染程度	植物	地下部生物量/(g·plant ⁻¹)			地上部生物量/(g·plant ⁻¹)		
		试验前	试验后	RGR	试验前	试验后	RGR
低浓度(L)	水蓼	0.19±0.03a	0.52±0.12b*	0.024	0.97±0.18a	3.08±0.53a	0.028
	红蓼	0.16±0.03ab	0.65±0.08ab*	0.033	0.75±0.21ab	3.58±0.59a	0.037
	叉分蓼	0.09±0.03b	0.54±0.08ab	0.042	0.37±0.03c	3.32±0.47a	0.052
	酸模叶蓼	0.23±0.03a	0.72±0.07a	0.027	0.46±0.13bc	2.91±0.09a	0.044
高浓度(H)	水蓼	0.16±0.02a	0.23±0.03c	0.009	0.65±0.15a	2.45±0.39b	0.032
	红蓼	0.18±0.05a	0.43±0.07b	0.020	0.71±0.23a	3.88±0.36a	0.040
	叉分蓼	0.12±0.04a	0.46±0.05b	0.031	0.39±0.12a	4.02±0.75a	0.055
	酸模叶蓼	0.17±0.03a	0.64±0.06a	0.032	0.57±0.19a	3.09±0.45ab	0.040

2.4 蓼属植物的氮磷积累量

由图 5 可知,低浓度污水培养下,4 种蓼属植物地上部氮积累量为 27.38~33.43 mg/plant,植物间无显著差异。高浓度污水培养下,红蓼地上部氮积累量达到 57.16 mg/plant,显著高于水蓼 38.25 mg/plant($p<0.05$),酸模叶蓼地下部氮积累量为 7.62 mg/plant,高于其他植物。低浓度污水培养下,4 种蓼属植物地上部磷积累量为 7.65~10.11 mg/plant,

植物间无明显差异。高浓度污水培养下,酸模叶蓼地上部磷积累量达到 15.32 mg/plant,显著高于水蓼和红蓼($p<0.05$),酸模叶蓼地下部磷积累量达到 1.74 mg/plant,显著高于其他植物($p<0.05$)。蓼属植物地上部氮积累量占总氮积累量的 82.28%~90.54%,蓼属植物地上部磷积累量占总磷积累量的 86.84%~93.74%,蓼属植物吸收的氮磷大部分积累在地上部。



注:图柱上方不同小写字母表示不同植物地上部间差异显著($p < 0.05$);不同大写字母表示不同植物地下部间差异显著($p < 0.05$)。

图5 不同污水浓度中蓼属植物的氮磷积累量

Fig. 5 Nitrogen and phosphorus accumulation of *Polygonum* plants in different sewage concentrations

3 讨论

3.1 蓼属植物对生活污水中氮的去除

污水中的氮主要通过植物的吸收及微生物的硝化和反硝化作用去除^[22-23]。植物吸收氮对污水中氮的去除起到关键作用,氮是植物叶绿素的主要组分之一,氮素浓度对植物光合作用有一定的影响^[24]。在本试验中植物的氮积累量与生物量具有一致性,地上部生物量和总生物量与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除存在显著的正相关关系^[25],较高的生物量有利于植物从污水中提取更多的氮^[26]。高浓度污水条件下,红蓼对于氮素的吸收能力较强,红蓼在试验早期对TN和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 具有更高的去除率,同时红蓼具有较高的生物量,因此红蓼对氮积累具有一定优势。水蓼生长受到污水浓度的抑制,其地上部和地下部生物量均显著低于其他植物($p < 0.05$),在试验的7~35天期间,水蓼对污水TN和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除速度较慢,而微生物的除氮过程具有更高可能性,污水中的TN由硝化和反硝化反应转化为 N_2 而从污水中散失,微生物作用对氮的去除贡献更高^[27],故水蓼对氮的吸收积累量较少。本试验中,植物吸收同化对氮的去除贡献达到29.93%~58.79%,这与吴科君^[28]的研究结论相似,说明植物吸收同化是氮素去除的重要途径之一^[29]。植物对不同形态氮的吸收具有一定的选择性,通常认为水生植物优先吸收 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 等还原态氮^[30-31],但本试验中蓼属植物对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除速度迅速,试验的前7天内对污水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除率达90%以上。卿悦等^[32]研究发现,水蓼对于 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的亲合力显著高于 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,表明水蓼对于 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的净化程度要高于 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,水蓼对于 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 有比较强烈的吸收偏好。此外,在试验初期植物进入水体当中通过呼吸作用降低污水中溶解氧的含量,有利于反硝化作用的进行^[33],也导致

试验初期 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的快速下降。氮的挥发也是水体中氮素损失的途径之一,但在本试验过程当中,污水温度维持在16.6~23.3℃,并未达到高温条件^[34],同时植物试验组中污水的pH为5.64~7.88,并未形成碱性环境,不利于氮的挥发^[35]。微生物活动可能是本试验过程中氮素去除的另一重要途径,从图1和图2中可以看出,酸模叶蓼对污水TN和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 也有较好的去除效果,其发达的根系可以为微生物提供充足的附着位点,根系通过自身组织运输氧气至根际部位,营造好氧环境,为硝化细菌提供良好的反应条件,有利于增强硝化作用,从而提高污水中TN的去除效果^[36]。

3.2 蓼属植物对生活污水中磷的去除

植物对于污水中的TP的去除主要依靠植物的吸收和根际微生物的降解^[37]。磷是植物必需的营养元素之一,是植物合成核酸、磷脂、磷酸腺苷等化合物的重要组成成分^[38]。4种蓼属植物对于低浓度污水中的TP均具有较高的去除率,不同蓼属植物的磷积累量之间没有显著性差异,植物吸收同化对于TP去除的贡献达到81.24%~99.33%,说明植物吸收是本研究中磷素去除最主要的方式,这与张云潇等^[39]研究结果较为一致。高浓度污水条件下,水蓼对污水TP的去除率显著低于其他植物($p < 0.05$),这可能是由于水蓼在较高浓度污水中生长状况较差,地上部和根系发育受到抑制,摄取磷的能力减弱,故磷积累量显著低于其他植物($p < 0.05$)。酸模叶蓼的磷积累量具有显著优势($p < 0.05$),这源于酸模叶蓼对磷更强的吸收能力,YE等^[17]研究发现,9种蓼科植物中,酸模叶蓼在水培及土培条件下均具有最高的磷积累量,聚类分析表明,酸模叶蓼对富磷土壤和水体中磷的积累和去除能力最强。此外,植物根系可以分泌有机酸提高磷的有效性,促进植物对磷的吸收^[40]。本研究中,红蓼、

叉分蓼和酸模叶蓼处理下污水 pH 显著低于水蓼和对照组,有利于对 Ca-P、Fe-P 等的利用。在高浓度污水当中,蓼属植物对磷素的去除贡献率下降为 64.83%~87.98%,说明微生物对磷的去除发挥一定的作用。蓼属植物发达的根系有利于磷素的截留和吸附,同时为微生物提供附着位点,增强微生物对磷素的利用过程,促进污水中 TP 的去除^[41]。

3.3 蓼属植物与常见水生植物脱氮除磷效果比较

不同水生植物对于污水中氮磷的去除效果各异。疏穗莎草和鱼腥草对浓度为 43.8 mg/L 的模拟污水中 TN 的去除率分别为 85.55% 和 83.52%^[16],香蒲、小浮萍和金鱼藻在 56 天内对浓度为 45.57 mg/L 的生活污水中 TN 的去除率达 82%~92%^[42],红蓼、叉分蓼和酸模叶蓼污水中对 TN 去除速度更快,28 天内对 TN 的去除率达 96% 以上。菖蒲和水葫芦在 30 天内对浓度为 6 mg/L 的模拟污水中 TP 的去除率为 78.8% 和 73.7%^[43],鸢尾对浓度为 8 mg/L 的模拟污水中 TP 的去除率仅有 36.59%^[14],而蓼属植物对高浓度污水中 TP 的去除率达 91.53%~99.82%。由此可见,相较于常见的水生植物,蓼属植物对生活污水具有更好的脱氮除磷效果。

4 结论

(1) 4 种蓼属植物对低浓度污水中 TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和 TP 均表现出较好的去除效果,植物间差异不显著;高浓度污水处理下,红蓼、叉分蓼和酸模叶蓼对 TP 的去除率达 99.50%~99.82%,均显著高于水蓼($p < 0.05$),试验的 14~28 天,水蓼对 TN 和 NH₄⁺-N 的去除率显著低于其他植物($p < 0.05$)。

(2) 4 种蓼属植物在 2 种浓度生活污水中均能正常生长。低浓度污水处理下,4 种蓼属植物地上部氮磷积累量分别为 27.38~37.47, 7.65~10.11 mg/plant,植物间差异不显著;高浓度污水处理下,水蓼地上部及地下部生物量显著低于其他植物($p < 0.05$),红蓼的地上部氮积累量最高达 57.16 mg/plant,显著高于水蓼($p < 0.05$),酸模叶蓼地上部磷积累量最高为 15.32 mg/plant,显著高于水蓼和红蓼($p < 0.05$)。

(3) 4 种蓼属植物均可用于修复较低浓度的生活污水,污水浓度较高时宜选择红蓼、叉分蓼和酸模叶蓼作为修复材料。

参考文献:

- [1] OLIVEIRA G A, COLARES G S, LUTTERBECK C A, et al. Floating treatment wetlands in domestic wastewater treatment as a decentralized sanitation alternative[J]. Science of the Total Environment, 2021, 773: e145609.
- [2] ANDERSON D M. Approaches to monitoring, control and management of harmful algal blooms (HABs)[J]. Ocean and Coastal Management, 2009, 52(7): 342-347.
- [3] 刘明文, 孙昕, 李鹏飞, 等. 3 种水生植物及其组合吸收去除水中氮磷的比较[J]. 环境工程学报, 2021, 15(4): 1289-1298.
- LIU M W, SUN X, LI P F, et al. Comparison of the absorption and removal of nitrogen and phosphorus from waterbody by three aquatic plants and their combinations[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(4): 1289-1298.
- [4] 黄铭, 张茗. 成都市农村生活污水处理现状调查[J]. 中国资源综合利用, 2024, 42(1): 191-194.
- HUANG M, ZHANG M. Investigation on the current situation of rural domestic sewage treatment in Chengdu city[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2024, 42(1): 191-194.
- [5] 张秋洁. 农村生活污水治理现状及主要应用技术分析[J]. 资源节约与环保, 2023(12): 132-135.
- ZHANG Q J. Present situation and main application technology analysis of rural domestic sewage treatment[J]. Resources Economization and Environmental Protection, 2023(12): 132-135.
- [6] 郭芳, 陈永, 王国田, 等. 我国农村生活污水处理现状、问题与发展建议[J]. 给水排水, 2022, 58(增刊 1): 68-72.
- GUO F, CHEN Y, WANG G T, et al. Present situation, problems and development suggestions of rural domestic sewage treatment in China[J]. Water and Wastewater Engineering, 2022, 58(S1): 68-72.
- [7] 姜姗, 黄锦楼, 阚凤玲, 等. 曝气条件对生态滤池处理农村生活污水的影响[J]. 环境工程学报, 2023, 17(4): 1252-1262.
- JIANG S, HUANG J L, KAN F L, et al. Effects of aeration conditions on the treatment of rural domestic-sewage by ecological filter[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(4): 1252-1262.
- [8] QU Y M, YANG Y F, SONNE C, et al. Phytosphere purification of urban domestic wastewater[J]. Environmental Pollution, 2023, 336: e122417.
- [9] MUSTAFA H M, HAYDER G. Recent studies on applications of aquatic weed plants in phytoremediation of wastewater: A review article[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2021, 12(1): 355-365.
- [10] LU B, XU Z S, LI J G, et al. Removal of water nutrients by different aquatic plant species: An alternative way to remediate polluted rural rivers[J]. Ecological Engineering, 2018, 110: 18-26.
- [11] REZANIA S, KAMYAB H, RUPANI P F, et al. Recent advances on the removal of phosphorus in aquatic

- plant-based systems[J]. Environmental Technology and Innovation, 2021, 24: e101933.
- [12] HU Z F, LI D S, GUAN D T. Water quality retrieval and algae inhibition from eutrophic freshwaters with iron-rich substrate based ecological floating beds treatment[J]. Science of the Total Environment, 2020, 712: e135584.
- [13] 苏媛, 高照良, 娄永才, 等. 3种浮床植物对关中地区2种污染源涝池水体净化效率研究[J]. 水土保持学报, 2020, 34(4): 347-353, 363.
- SU Y, GAO Z L, LOU Y C, et al. Study on the purification effects of three floating-bed plants for water bodies of two pollution sources in water storage pond of Guanzhong area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(4): 347-353, 363.
- [14] XU J L, LIU J, HU J Q, et al. Nitrogen and phosphorus removal in simulated wastewater by two aquatic plants[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(44): 63237-63249.
- [15] 苏甜, 管升明, 谢亨旺, 等. 灌渠水葫芦危害、资源化及治理措施研究[J]. 环保科技, 2021, 27(5): 53-58.
- SU T, GUAN S M, XIE H W, et al. Harm, resource utilization and control measures of *Eichhornia crassipes* Solms in Ganfu Plain irrigation area[J]. Environmental Protection and Technology, 2021, 27(5): 53-58.
- [16] 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.
- XIE D S, ZHU W Y, CHEN J P, et al. Effects of five aquatic plants in South China on purification of municipal wastewater[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(8): 1903-1908.
- [17] YE D H, XIE M, ZHANG X Z, et al. Evaluation for phosphorus accumulation and removal capability of nine species in the *Polygonaceae* to excavate amphibious superstars used for phosphorus-phyto extraction [J]. Chemosphere, 2022, 308: e136361.
- [18] ZHENG Z C, LI T X, ZENG F F, et al. Accumulation characteristics of and removal of nitrogen and phosphorus from livestock wastewater by *Polygonum hydropiper* [J]. Agricultural Water Management, 2013, 117: 19-25.
- [19] 中国科学院生态环境研究中心. 西南地区农村生活污水处理技术指南[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2010.
- Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences. Technical guide for rural domestic sewage treatment in Southwest China[S]. Beijing: Ministry of Housing and Urban-Rural Development of People's Republic of China, 2010.
- [20] 魏复盛. 国家环境保护总局, 水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 701-705.
- WEI F S. General Administration of Environmental Protection of the People's Republic of China, Water and Wastewater Monitoring and Analysis Method Editorial Committee. Water and wastewater monitoring and analysis method[M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 701-705.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- LU R K. Soil agrochemical analysis method[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [22] CAO W P, ZHANG Y Q. Removal of nitrogen (N) from hypereutrophic waters by ecological floating beds (EFBs) with various substrates[J]. Ecological Engineering, 2014, 62: 148-152.
- [23] LI X, LI Y Y, LI Y, et al. The phytoremediation of water with high concentrations of nitrogen and phosphorus contamination by three selected wetland plants [J]. Journal of Water Process Engineering, 2021, 40: e101828.
- [24] 白江珊, 唐浩然, 娄彦景. 水深和氮添加对湿地植物功能性状的影响研究进展[J]. 生态学杂志, 2021, 40(9): 2987-2995.
- BAI J S, TANG H R, LOU Y J. Effects of water depth and nitrogen addition on functional traits of wetland plants: A review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(9): 2987-2995.
- [25] CHENG X Y, LIANG M Q, CHEN W Y, et al. Growth and contaminant removal effect of several plants in constructed wetlands[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2009, 51(3): 325-335.
- [26] SUDIARTO S I A, RENGAMAN A, CHOI H L. Floating aquatic plants for total nitrogen and phosphorus removal from treated swine wastewater and their biomass characteristics[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 231: 763-769.
- [27] 唐伟, 许海, 詹旭, 等. 生态浮床对千岛湖水体氮磷净化效果研究[J]. 环境科学研究, 2022, 35(4): 926-935.
- TANG W, XU H, ZHAN X, et al. Nitrogen and phosphorus purification effects of ecological floating bed in Qiandao Lake[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(4): 926-935.
- [28] 吴科君. 植物浮床系统对三峡库区支流库湾富营养化水体的净化效果研究[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- WU K J. Study on purification effect of plant floating bed system on eutrophic water in tributary reservoir bay of Three Gorges Reservoir[D]. Chongqing: Southwest University, 2020.
- [29] 罗固源, 郑剑锋, 许晓毅, 等. 4种浮床栽培植物生长特性

- 及吸收氮磷能力的比较[J].环境科学学报,2009,29(2):285-290.
- LUO G Y, ZHENG J F, XU X Y, et al. Comparison of the growth characteristics and nutrient uptake of four kinds of plants cultivated on a floating-bed[J].Acta Scientiae Circumstantiae, 2009,29(2):285-290.
- [30] FANG Y Y, BABOURINA O, RENGEL Z, et al. Ammonium and nitrate uptake by the floating plant *Landoltia punctata* [J].Annals of Botany,2007,99(2):365-370.
- [31] 韩璐瑶,吕锡武.水生蔬菜型湿地植物对氮、磷营养盐的吸收动力学[J].环境工程学报,2017,11(5):2828-2835.
- HAN L Y, LYU X W. Absorption kinetics of nitrogen and phosphorus in aquatic vegetables in wetland[J].Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11 (5):2828-2835.
- [32] 卿悦,李廷轩,叶代桦.无机氮处理对矿山生态型水蓼氮积累及根系形态的影响[J].草业学报,2020,29(1):203-210.
- QING Y, LI T X, YE D H. Effects of inorganic N on the N accumulation and root morphology of a mining ecotype of *Polygonum hydropiper* [J].Acta Prataculturae Sinica,2020,29(1):203-210.
- [33] 周佳林,段婧婧,王宁,等.陆生蔬菜浮床对富营养化水体氮磷的去除以及水体、根系细菌群落分析[J].生态与农村环境学报,2024,40(1):107-118.
- ZHOU J L, DUAN J J, WANG N, et al. The removal of N and P by terrestrial vegetable floating beds in eutrophic waters and the microbiological analysis of water and root system[J].Journal of Ecology and Rural Environment,2024,40(1):107-118.
- [34] 卢丽丽,吴根义.农田氨排放影响因素研究进展[J].中国农业大学学报,2019,24(1):149-162.
- LU L L, WU G Y. Advances in affecting factors of ammonia emission in farmland[J].Journal of China Agricultural University,2019,24(1):149-162.
- [35] BIAŁOWIEC A, JANCZUKOWICZ W, RANDERSON P F. Nitrogen removal from wastewater in vertical flow constructed wetlands containing LWA/gravel layers and reed vegetation[J].Ecological Engineering,2011,37(6):897-902.
- [36] 殷芳芳,胡恩保. A^2/O 耦合生物曝气滤池强化污水脱氮除磷[J].环境工程,2019,37(6):73-77.
- YIN F F, HU E B. Research on enhanced nitrogen and phosphorus removal from wastewater by A^2/O coupled biological aerated filter[J].Environmental Engineering, 2019,37(6):73-77.
- [37] KUMAR S, DESWAL S. Phytoremediation capabilities of *Salvinia molesta*, water hyacinth, water lettuce, and duckweed to reduce phosphorus in rice mill wastewater [J]. International Journal of Phytoremediation,2020,22(11):1097-1109.
- [38] CHAN C, LIAO Y Y, CHIOU T J. The impact of phosphorus on plant immunity[J].Plant and Cell Physiology,2021,62(4):582-589.
- [39] 张云潇,徐佳敏,卢少勇,等.风车草对低污染水体氮磷的净化效能[J].农业资源与环境学报,2021,38(5):735-745.
- ZHANG Y X, XU J M, LU S Y, et al. Purification effect of *Cyperus alternifolius* L. on low-polluted water [J].Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021,38(5):735-745.
- [40] 李廷轩,叶代桦,张锡洲,等.植物对不同形态磷响应特征研究进展[J].植物营养与肥料学报,2017,23(6):1536-1546.
- LI T X, YE D H, ZHANG X Z, et al. Research advances on response characteristics of plants to different forms of phosphorus[J].Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017,23(6):1536-1546.
- [41] 刘姣.不同湿地植物及其组合对生活污水的脱氮除磷效果研究[D].长春:东北师范大学,2021.
- LIU J. Research on the effect of different wetland plants and their combinations on denitrification and phosphorus removal from domestic sewage[D].Changchun: Northeast Normal University,2021.
- [42] XING W, HAN Y, GUO Z, et al. Quantitative study on redistribution of nitrogen and phosphorus by wetland plants under different water quality conditions[J].Environmental Pollution,2020,261:e114086.
- [43] 英河.生活污水中氮、磷、COD 污染的植物修复研究[D].北京:中国地质大学,2019.
- YING H. Research on phytoremediation treatment for nitrogen, phosphorus and COD in domestic wastewater [D].Beijing: China University of Geoscience,2019.