

湿地植物对模拟污水的净化能力研究

祝宇慧, 赵国智, 李灵香玉, 田光明

(浙江大学环境与资源学院, 浙江 杭州 310029)

摘要 选择了千屈菜、水芹、水葱、黄菖蒲、石菖蒲、香菇草为待试湿地植物,通过静态水培试验,考察了各植物在以氨氮(NH_4^+-N)为主要氮组分的模拟污水中的生长情况、生理生态学特性,及在不同停留时间下对污水中有机物、N、P 的去除率,以期找出不同条件下净化污水的优势植物。结果表明,植物在污水中均能正常生长,对营养物都有一定的吸收能力,对水体有明显的净化效果。其中石菖蒲植株内 N、P 浓度最高,净化效果较好,当停留时间为 8 d 时,对 NH_4^+-N 和 TP 的去除率分别为 90.52% 和 92.89%。水芹生长稳定,在较短时间内对 N、P 均有较好的去除效果。香菇草在停留时间较长的条件下对污染物的去除率较高,当停留时间为 8 d 时,对 NH_4^+-N 和 TP 的去除率分别为 94.90% 和 93.35%。可见,石菖蒲、水芹和香菇草对营养物质具有较好净化效果,是较理想的湿地植物。

关键词 湿地植物 富营养化 营养物吸收 去除率

中图分类号 X173 **文献标志码** A **文章编号** 1672-2043(2009)01-0166-07

Purification Ability of Wetland Plants for Simulated Wastewater

ZHU Yu-hui, ZHAO Guo-zhi, LI Ling-xiang-yu, TIAN Guang-ming

(College of Environment and Resource Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

Abstract: In this study, six plants: *Lythrum salicaria* (Ly), *Oenanthe javanica* (Oe), *Scirpus validus* (Sc), *Iris pseudacorus* (Ir), *Acorus gramineus* (Ac), *Hydrocotyle vulgaris* (Hy), were selected and fed by simulated wastewater containing ammonia nitrogen (NH_4^+-N) as the main component of nitrogen. The purification ability and bio-ecological character of tested plants were studied by a static water culture experiment. It was found that all plants could live normally in wastewater and there was apparent purification of nitrogen in wastewater. Among them, the highest nutrient concentration in biomass was found in Ac., where removal rates of NH_4^+-N and TP were 90.52% and 92.89% respectively within 8-days retention time (the highest removal efficiency among the treatments). Among the six testes plants, Oe. was found to be relatively advantageous to remove N and P in shorter retention time, while Hy. provided relatively higher removal capacity for NH_4^+-N (94.90%) and TP (93.35%) in longer retention time (8 days). The plants of Ac., Oe. and Hy. were found as the satisfactory wetland plants, which had better treatment performances.

Keywords: wetland plants; eutrophication; nutrient assimilation; removal efficiency

水体富营养化是全球性的环境问题,而传统的集中、大规模的污水处理方式,投资、运行费用高,对 N、P 的去除率较低(只有 30%~50%)^[1],经处理后的出水排放后仍会引起富营养化等问题。人工湿地作为一种分散的污水处理技术,不仅具有较高的 N、P 去除率,还具有建造及运行费用低、维护简单、效果好、适用面广、耐负荷冲击能力强、美化环境等优点,为解决污水

处理厂出水 N、P 超标问题及分散的村镇生活污水污染等问题提供了新的选择^[2-3]。植物是人工湿地的重要组成部分之一,在系统中起关键作用,主要表现在吸收污染物,植物根系向基质释放氧气,植物根系固定植物床,改变水力传导能力,创造生物共生条件,影响微生物和酶的分布以及植物的景观美学作用等方面^[4-6]。其中植物的作用对 N、P 营养物质的去除具有十分重要的作用,因此在湿地研究中也得到普遍重视。其中氨氮是生活污水中 N 的主要成分,其去除和转化是湿地脱氮的关键。本文研究了不同湿地植物对模拟污水中 N、P 污染物的去除率及植物的生理生态

收稿日期 2008-03-20

基金项目 浙江省科技厅重点科技计划项目(2006C23076)

作者简介 祝宇慧(1984-),女,浙江湖州人,硕士研究生,环境工程专业。

通讯作者 田光明 E-mail: gmtian@zju.edu.cn

学特性,比较了每种植物对污水的适应能力和净化作用,为湿地植物的选择和提高人工湿地的污水处理效率提供了参考依据。

1 材料与方法

1.1 供试湿地植物

试验选用水生植物为千屈菜^[7] (*Lythrum salicaria*), 水芹^[8] (*Oenanthe javanica*), 水葱^[7,9] (*Scirpus validus*), 黄菖蒲^[10] (*Iris pseudacorus*), 石菖蒲^[11] (*Acorus gramineus*), 香菇草 (*Hydrocotyle vulgaris*) 6 种挺水植物。

1.2 试验设计

试验用模拟污水的方法考察 6 种湿地植物对 N、P 营养成分的吸收消耗情况,通过添加葡萄糖、硫酸铵、磷酸二氢钾模拟富营养化水体水质,使初始水质为 pH 值为 6.5~7.5, COD_{Cr} 为 42~53 mg·L⁻¹, NH₄⁺-N 为 12~15 mg·L⁻¹, TP 为 0.8~1.0 mg·L⁻¹。湿地植物香菇草的培养采用长 39 cm, 宽 27 cm, 高 15 cm 的水箱, 其余植物采用 11 L 的塑料水桶, 水容积均为 9 L。湿地植物每桶 2~4 株。每桶水面用有定植孔的塑料泡沫板作栽培定植板, 在定植孔中用海绵固定植物。每桶为 1 个重复, 每种植物设 3 个重复, 并设一组覆有泡沫板无植物的空白对照和无覆盖物无植物的空白对照。试验期间通过加自来水来补充蒸发、蒸腾和采样所耗的水分, 以保持桶中水位。试验于 2007 年 4 月—2007 年 7 月在浙江大学华家池玻璃温室内进行, 持续时间为 101 d。试验期间植物系统对污水的停留时间分别为 8、6、4 和 2 d, 每个停留时间设两个重复, 取其平均值, 考察不同植物在不同停留时间下各植物系统对污染物的去除效率。

1.3 样品采集和分析

1.3.1 水样的采集和分析

采样前现场测水质指标 pH 值、溶解氧 DO 及水温 *t*。其中 pH 值采用 pH501 便携式 pH 计, DO 和 *t* 采用 HI9145 便携式溶解氧测量仪。取样前用玻璃棒在水桶内搅拌数下, 用注射器抽取水面下 5 cm 水样 150 mL, 尽快进行水质分析。分析项目包括 COD_{Cr}、总磷 TP、氨氮 NH₄⁺-N。检测方法为^[12] COD_{Cr} 采用密封催化消解法; TP 采用过硫酸钾氧化-钼锑抗分光光度法; NH₄⁺-N 采用纳氏试剂光度法。

1.3.2 植物样的采集和分析

2007 年 7 月底, 试验结束后 (共计 101 d), 收集每桶中的植物, 洗净, 在 80 °C 烘箱^[13]中烘至恒重后称

重, 测定植株生物量 (干重) 和分析植物的相对生长速率 (Relative growth rate) 及植株体 N、P 的含量。植物样品用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮制备成溶液, TN 含量用过硫酸钾氧化吸光光度法测定^[13]; TP 用钒钼蓝法测定^[13]。植物相对生长速率^[14] RGR (d⁻¹) = (ln W₂ - ln W₁) / (t₂ - t₁), 试验开始时 *t*₁ 的干生物量 W₁, 试验结束时 *t*₂ 的干生物量 W₂。

2 结果与分析

2.1 植物生长情况和营养物质的吸收

2.1.1 植物在污水中的生长情况

大部分植物在试验期间一直生长旺盛, 每株植物都有新叶发出, 植物根系生长良好, 有分蘖, 尤其以水芹和香菇草最为突出, 香菇草地下横走茎发达。黄菖蒲、千屈菜和水芹陆续开花, 千屈菜花期较长, 花色鲜艳。黄菖蒲长势不好, 出现叶片变黄, 根部萎焉症状。水葱由于植株较高, 发生倒伏。植物生存状况间接反映了植物的耐污力, 这也是植物能够达到湿地备选植物标准的重要条件之一。作为污水处理湿地植物, 耐污力是植物生存和为微生物提供依附场所的前提。除了植物的表观特征, 植物的相对生长率 RGR 也可以用于评价植株的健康状况。从表 1 可以看到, 千屈菜和香菇草表现出较高的相对生长率, 分别为 0.048 d⁻¹、0.042 d⁻¹, 石菖蒲的相对生长率最低, 为 0.011 d⁻¹, 这与石菖蒲自身具有生长较缓慢的特性有关。

6 种试验植物在污水中生长 101 d 后, 各种植物 (表 1) 的总生物量在 783.9~1 537.0 g·m⁻² 之间, 其中千屈菜最高 (1 537.0 g·m⁻²), 石菖蒲最低 (783.9 g·m⁻²)。植物的地上地下生物量比 (A/U) 表现了植物的生理特征, 也为植物的收割方式提供了参考, 各种植物的地上地下生物量比 (A/U) 在 0.36~1.08 之间, 除香菇草外, 大部分植物地下生物量占总生物量的 50%~

表 1 湿地植物的生物量和相对生长速率 (RGR)

Table 1 Biomass and Relative growth rate (RGR) of the tested plants

植物种 Plant species	生物量 biomass/g·m ⁻²			A/U	RGR/d ⁻¹
	地上 Above	地下 Underground	总生物量 Total biomass		
千屈菜	749.5±143	787.5±174	1 537.0±317	0.95	0.048
水芹	349.9±68	540.5±63	890.4±131	0.65	0.028
水葱	359.5±101	990.6±241	1 350.1±343	0.36	0.022
黄菖蒲	349.0±182	555.0±233	904.0±415	0.63	0.013
石菖蒲	280.6±99	503.3±75	783.9±149	0.56	0.011
香菇草	411.7±44	380.8±43	792.5±87	1.08	0.042

70%。有人对 21 种人工湿地植物在去除观赏水中 N、P 的贡献进行了研究^[10],大部分植物 A/U 在 1.18~4.29 之间,其中黄菖蒲为 1.18,大于本试验中的 0.63,这可能与本次试验采用水培方式有关,植物为了多吸收养分,形成了异常发达的根系,从而导致 A/U 比值较小。

2.1.2 植物对营养物的吸收

表 2 显示了湿地植物对营养物的吸收能力。植物对 N 的吸收速率在 $0.133\sim 0.202\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 之间,千屈菜的吸收速率最高。以往研究表明,湿地植物对 N 的吸收量为 $0.03\sim 0.3\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ^[15],各植物对 P 的吸收速率在 $0.012\sim 0.017\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 之间,其中黄菖蒲的吸收速率最高。

植物种类对 N、P 的积累量有一定的影响,供试植物的 N、P 积累量分别在 $13.54\sim 18.86\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 及 $1.53\sim 1.69\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间,有人研究了 7 种湿地植物中 N、P 积累量分别为 $5.67\sim 27.02\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 及 $0.44\sim 1.46\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间^[16],与本次研究结果大致相似。植物较高的营养物积累量在污水处理中是有利的,因为可以通过植物收割将其固定的 N、P 带出水体^[17]。

植物体内的 N、P 浓度反映了该植物种对 N、P 的吸收能力。在本研究中,6 种植物的 N、P 浓度分别在 $11.19\sim 21.46\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 及 $0.995\sim 2.16\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间,其中石菖蒲的 N、P 浓度最高,水葱的 N 浓度及千屈菜的 P 浓度最低。DeBusk^[18]的研究结果为,在中度富营养化 (TN、TP 分别为 $11.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $3.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 水中,10 种挺水植物的 N、P 浓度分别在 $10.2\sim 25.5\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 及 $1.3\sim 3.7\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间。蒋跃平等^[9]研究显示轻度富营养化水中 (TN、TP 分别为 $1.71\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.08\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),17 种植物的 N、P 浓度分别在 $10.68\sim 32.66\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 及 $0.73\sim 3.36\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间。而本次试验中 TN、TP 分别约为 16 和 $0.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,通过比较可以发现,大

部分植物还有很大的 N、P 吸收空间,特别是对于 P 的吸收。

2.2 各植物系统内水质指标情况

2.2.1 植物成熟期水质理化指标情况

依次进行停留时间为 8、6、4、2 d 下的净化试验,对各植物系统的水质理化指标 pH 和 DO 进行测定 (表 3),各植物系统 pH 值明显低于无植物系统,除黄菖蒲系统 pH 与 Kb 无显著差异 ($P>0.05$) 外,各植物系统的 pH 值与两个空白对照系统均有显著性差异 ($P<0.05$)。水生植物对 NH_4^+-N 的吸收导致水中 pH 降低,因为植物根部在吸收阳离子的同时释放出 H^+ ,即伴随着有机酸的产生^[19],并且硝化作用的进行也使水中 H^+ 增加。另外植物夜间呼吸作用主要从大气中吸收 O_2 ,向水体中释放部分 CO_2 ,其白天的光合作用所吸收的 CO_2 又来自大气环境,这势必使废水中溶解的 CO_2 增加^[19],pH 值也就降低了。 NH_4^+-N 的浓度决定了生活污水处理过程中 pH 的变化,从而使各植物系统内 pH 值变化各异。

因试验容器有限,对 DO 的影响没有明显规律性,各系统之间的溶解氧没有显著性差异,可能试验中水体处于非流动状态,影响了水中的供氧水平。由于水生植物的生长需要消耗氧气,而另一方面水生植物的光合作用和根系都能释放出氧气,因此水中溶解氧的高低与水生植物的生长活动有关。千屈菜、水芹和香菇草水体中的 DO 浓度低于 Ka 系统,差异性显著 ($P<0.05$)。

比较 Ka 和 Kb 系统,可以发现覆盖处理对水中的 pH 值和 DO 有明显的作用,当处理时间大于 2 d 时,Kb 系统中 pH 值和 DO 低于 Ka 系统,差异性显著 ($P<0.05$)。

2.2.2 各植物系统对 COD_Cr 的去除

表 4 显示了在不同停留时间下各系统 COD_Cr 的

表 2 湿地植物对 N、P 的吸收

Table 2 Nutrient assimilation of wetland plants

植物种 Plant species	营养物吸收量/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ Nutrient uptake		营养物积累量/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ Nutrient storage		营养物浓度/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ Nutrient concentration		植物对污水中 N、P 去除的贡献率/%	
	N	P	N	P	N	P	N	P
千屈菜	0.202	0.015 1	18.86 ± 1.3	1.53 ± 0.17	12.27 ± 0.028	0.995 ± 0.078	69.67	74.08
水芹	0.152	0.015 4	15.29 ± 0.57	1.57 ± 0.24	17.17 ± 1.53	1.76 ± 0.028	78.62	74.35
水葱	0.169	0.015 5	15.11 ± 0.65	1.57 ± 0.31	11.19 ± 0.41	1.16 ± 0.032	66.67	78.88
黄菖蒲	0.159	0.017 0	15.85 ± 1.7	1.66 ± 0.13	17.53 ± 0.63	1.84 ± 0.088	68.70	73.55
石菖蒲	0.167	0.016 7	16.82 ± 2.3	1.69 ± 0.37	21.46 ± 0.23	2.16 ± 0.014	81.21	77.24
香菇草	0.133	0.012 1	13.54 ± 1.82	1.22 ± 0.28	17.09 ± 0.049	1.54 ± 0.014	89.00	81.86

表 3 不同停留时间下各系统的 pH 值和 DO

Table 3 The value of pH and DO at different retention time

植物 Plant species	停留时间/d Retention time							
	2		4		6		8	
	pH	DO	pH	DO	pH	DO	pH	DO
千屈菜	6.0	0	4.27	4.84	4.23	4.1	3.27	5.35
水芹	4.1	5.04	4.0	5.71	4.45	3.56	3.4	4.73
水葱	6.6	4.41	5.5	9.93	6.17	4.92	4.07	5.22
黄菖蒲	6.6	3.94	6.5	9.26	5.8	5.64	4.13	5.4
石菖蒲	6.5	1.42	5.6	8.28	5.95	4.5	3.95	7.03
香菇草	5.3	3.65	4.0	3.67	4.15	4.35	3.45	5.11
Ka	7.7	6.35	8.8	10.15	8.9	9.44	8.0	8.74
Kb	7.9	6.17	7.1	2.84	7.4	4.54	6.4	3.73

注 ①Ka 为无植物无覆盖物系统 control system Kb 为无植物有泡沫板系统 foamy board system。下表同。② DO 单位为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

去除情况。当停留时间为 2 d 时,有植物系统的去除率均显著高于无植物系统 ($P<0.05$),这时植物通过对有机物的吸收和同化,对 COD_{Cr} 的去除有明显的作用。当停留时间为 4、6、8 d 时,同空白对照比较,绝大部分种类植物的存在并没有显著提高对有机物的去除能力,这与胡勇有等^[20]的研究结果相同,仅有石菖蒲的去除率高于两种空白对照。人工湿地系统是通过过滤、沉淀、吸附、生物降解等物理、化学、生物多种过程的共同作用去除污水中的有机物,其中,大量微生物(如细菌和真菌)的存在对此起着十分重要的作用。微生物消耗并降解了大量的有机物,净化了水质。湿地植物主要通过光合作用吸收空气中的 CO_2 作为生长所需的碳源,而并不依靠从根部摄取另外的物质为碳源。因此,湿地植物只是主要在两个方面支持微生物的生命活动,一是植物的根系等组织为微生物的生长提供可依附的表面;二是植物的根系能够释放一定

量的氧气^[21],通过改变根系周围环境的氧化还原状态,从而影响污染物的生物降解过程。故在本研究中,相对于基质微生物的降解转化,各植物在对有机物的去除方面只是表现出一定的辅助作用,所占比重较小,且植物在水培期间产生的衰败残留物,导致有机质溶出,植物根系及根系分泌物都有助于系统中的有机物积累量增加,这使得 COD_{Cr} 的去除率的变化各异,不一定随处理时间的延长而提高。在本试验中,对于 COD_{Cr} 的去除而言湿地植物处理污水的停留时间以 2 d 为宜。对照的 COD_{Cr} 去除率随时间的延长而增加,主要是因为微生物侵入后对污水 COD_{Cr} 的降解作用所致。

2.2.3 各植物系统对 TP 的去除

表 5 为在不同停留时间下各系统对 TP 的去除情况。各植物系统对 TP 的去除率均高于无植物系统,差异性显著 ($P<0.05$),可见植物吸收对 TP 的去除有一定作用。另外植物根部环境为聚磷菌提供了良好的条件,而聚磷菌的产生对污水中的 P 的去除很重要。无植物无覆盖物系统的去除率高于无植物有覆盖物系统,差异性显著 ($P<0.05$)。不同的植物在 P 的去除速率上表现出不同的特点,绝大部分的植物表现出随停留时间加长而去除率增加的现象。在停留时间为 8 d 时,对 TP 的去除率最高,均达到 80%甚至 90%以上,能较好地去除水中的 TP。黄菖蒲、石菖蒲和香菇草对 TP 的去除率随停留时间的增加而增加。当停留时间为 8 d 时,香菇草 TP 的去除率最高,去除率为 93.35%,依次分别为:香菇草>石菖蒲>水芹>千屈菜>黄菖蒲>水葱。但水芹在第 2 d 就表现出很高的除磷效果,随时间有起伏,这可能有其特殊的原因,有待进一步的研究。对照系统中 P 也有一定程度的降低,这可能与水培过程中的沉降等作用有关。

表 4 不同停留时间下植物对 COD 去除效果 (%)

Table 4 Removal efficiency of plants for COD at different retention time (%)

植物种 Plant species	2 d		4 d		6 d		8 d	
	去除率 Remove rate	标准偏差 SD	去除率 Remove rate	标准偏差 SD	去除率 Remove rate	标准偏差 SD	去除率 Remove rate	标准偏差 SD
千屈菜	62.98	5.1	64.37	2.3	45.52	8.6	49.59	2.5
水芹	75.75	0.3	41.49	15.8	44.55	10.7	81.64	4.6
水葱	71.87	7.9	28.72	19.8	71.20	3.1	83.08	2.7
黄菖蒲	77.11	4.3	51.81	14.3	73.93	4.7	78.40	7.6
石菖蒲	90.71	7.2	71.81	2.3	78.32	4.1	87.47	0.6
香菇草	54.44	18.9	63.3	2.3	75.49	1.7	84.88	3.04
Ka	2.53	1.8	62.34	3.1	76.65	1.9	66.30	4.9
Kb	-7.89	1.8	60.85	2.5	76.65	1.7	81.88	2.8

2.2.4 各植物系统对 NH_4^+-N 的去除

表 6 显示了不同停留时间下各系统对 NH_4^+-N 的去除情况。与 TP 的去除情况类似,各植物系统对 NH_4^+-N 的去除率均显著高于无植物系统 ($P<0.05$)。由表 2 也可知,植物在 N 的去除中起了较大作用,对污水中 N 去除的贡献率为 65%以上。说明废水中的 NH_4^+-N 作为植物生长过程中不可缺少的物质可以直接被植物吸收,合成植物蛋白质与有机氮。并且植物通过光合作用产生氧气后,通过根系输送至根区,形成根表面的氧化状态, NH_4^+-N 被这一区域的硝化细菌硝化,离根表面较远的区域氧浓度降低,N 素物质经异养反硝化途径以氮气形式释放到大气中。影响硝化过程的因素有溶解氧 DO、pH 值、温度、水的碱度、无机碳源、湿度、微生物种群及氨氮的浓度。硝化作用进行的最佳 pH 值为 6.6~8.0,当然系统也能适应较低的 pH 来进行硝化作用^[22],当 $\text{pH}<5.0$,硝化作用几乎停止。各植物系统的 pH 值较低与硝化作用的进行也有一定关

系,有研究表明在硝化过程中需要消耗大量的碱度,1 mg 氨氮被氧化大约需要消耗 8.64 mg HCO_3^- ^[22]。

无植物无覆盖物系统的去除率均显著高于无植物有覆盖物系统 ($P<0.05$)。人工湿地系统是通过基质的吸附、沉淀、过滤、植物吸收、微生物的硝化和反硝化作用来去除污水中的 N。而在空白对照中,氨氮的挥发和微生物的硝化和反硝化作用是去除 N 的主要途径。在各植物系统中,随着停留时间的增加,各植物对 NH_4^+-N 的去除率表现出不同变化趋势。水芹在停留时间较短时去除率较高,黄菖蒲和石菖蒲随停留时间的增加去除率相应提高。当停留时间为 8 d 时,各植物对 NH_4^+-N 的去除率大小依次为:香菇草>石菖蒲>黄菖蒲>水芹>千屈菜>水葱。当停留时间为 4 d 时,各植物对 NH_4^+-N 的去除率大小依次为:水芹>香菇草>石菖蒲>千屈菜>水葱>黄菖蒲。因此应根据不同的植物种类,确定不同的停留时间来达到最佳的 NH_4^+-N 去除效率。

表 5 不同停留时间下植物对 TP 去除效果 (%)

Table 5 Removal efficiency of plants for TP at different retention time (%)

植物种 Plant species	2 d		4 d		6 d		8 d	
	去除率 Remove rate	标准偏差 SD	去除率 Remove rate	标准偏差 SD	去除率 Remove rate	标准偏差 SD	去除率 Remove rate	标准偏差 SD
千屈菜	35.26	5.4	83.25	0.7	82.35	4.5	91.01	0.94
水芹	90.81	1.2	88.43	0.8	66.19	8.5	91.39	1.9
水葱	51.75	4.1	87.29	0.8	82.41	6.7	83.21	8.3
黄菖蒲	45.06	9.1	72.78	0.9	76.63	8.4	88.02	1.1
石菖蒲	44.48	8.5	85.58	3.8	86.76	2.6	92.89	2.1
香菇草	69.48	2.2	85.49	1.5	90.67	0.8	93.35	1.2
Ka	3.07	1.3	32.45	5.5	23.24	2.9	18.54	3.7
Kb	-1.35	2.3	10.82	2.1	14.86	1.0	17.98	2.7

表 6 不同停留时间下植物对 NH_4^+-N 去除效果 (%)Table 6 Removal efficiency of plants for NH_4^+-N at different retention time (%)

植物种 Plant species	2 d		4 d		6 d		8 d	
	去除率 Remove rate	标准偏差 SD	去除率 Remove rate	标准偏差 SD	去除率 Remove rate	标准偏差 SD	去除率 Remove rate	标准偏差 SD
千屈菜	62.25	1.1	83.25	1.1	67.17	1.2	74.06	0.7
水芹	92.87	3.1	93.22	0.5	76.64	3.0	80.76	11.2
水葱	54.64	1.7	78.96	6.0	62.46	9.3	45.72	15.7
黄菖蒲	51.66	4.3	56.5	1.9	77.5	2.1	82.63	16.1
石菖蒲	55.13	2.4	83.67	5.6	82.64	0.2	90.52	5.5
香菇草	74.04	9.2	92.57	1.5	83.93	1.3	94.90	0.4
Ka	-0.74	0.2	35.23	3.3	22.38	4.1	20.22	1.8
Kb	-0.27	1.1	22.32	5.2	8.44	2.2	7.55	0.8

3 讨论

本研究发现,对于生长在相同条件下的6种植物,其生物量变化很大,这与植物内在特性有关,也反映了植物在污水中的生长情况^[23]。本研究中的植物都通过对N、P的吸收积累起到了对污水中营养物质的去除作用。水芹生长稳定,净化效果好,在停留时间较短时尤佳。千屈菜生长快,生物量高,具有最高的N吸收速率和N积累量且具有很好的美观价值。水葱植株较高,特别适合要求视野开阔的人工湿地。黄菖蒲的P吸收速率和P积累量最高,但处理效果不佳。

本研究发现石菖蒲植株内N、P浓度最高,净化效果较好。有研究表明石菖蒲具有克藻效应^[24],而藻类是水体中重要的有机制造者,直接影响污水湿地处理系统的处理效果。因此,石菖蒲对藻类的抑制作用可减少藻类对污水湿地处理工程的不利影响,这在本研究中石菖蒲系统的N、P污染物去除率较高得以体现。且石菖蒲能越冬生长,这可以增强人工湿地冬季处理效果。

香菇草作为湿地植物在以往的研究中并不多见,但本研究结果表明,香菇草对污染物有很好的净化效果,但植株较小,适合与高大挺水植物组合使用。

4 结论

(1) 不同的植物对污水环境有不同的适应方式,其中石菖蒲植株内N、P浓度最高,净化效果较好。水芹生长稳定,在较短时间内对N、P均有较好的去除效果。香菇草在停留时间较长的条件下对 COD_Cr 、N、P的去除率较高,可见,石菖蒲、水芹和香菇草对营养物质具有较好的净化效果,是较理想的湿地植物。

(2) 各植物对N、P的去除均有明显的效果。在植物成熟期,当停留时间为2d时,有植物系统对 COD_Cr 去除率均显著高于无植物系统。当停留时间为4、6、8d时,6种湿地植物对净化有机物的贡献率很小,故湿地植物对污水 COD_Cr 的去除并不是很好的选择。在停留时间分别为2、4、6、8d时,各植物系统对TP的去除率均显著高于无植物系统,其中当停留时间为8d时,香菇草对TP的去除率最高(93.35%),适合用于以P为主要目标污染物的污水处理。与TP的去除情况类似,各植物系统对 NH_4^+-N 的去除率均显著高于无植物系统,当停留时间为8d时,香菇草(94.90%)和石菖蒲(90.52%)对 NH_4^+-N 的去除效果较好。

参考文献:

- [1] 王世和. 人工湿地污水处理理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
WANG Shi-he. Theory and technology on wastewater treatment with constructed wetlands[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [2] Cristina S C, Calheiros, Antonio OSS, et al. Constructed wetland systems vegetated with different plants applied to the treatment of tannery wastewater[J]. *Water Research*, 2007, 41: 1790-1798.
- [3] Huang J, Reneau J R, Hagedorn C. Nitrogen removal in constructed wetlands employed to treat domestic wastewater[J]. *Water Research*, 2000, 34 (9): 2582-2588.
- [4] Brix H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands?[J]. *Water Science and Technology*, 1997, 35 (5): 11-17.
- [5] 刘常春, 夏汉平, 简曙光, 等. 多层次多物种配置人工湿地处理生活污水研究[J]. *生态环境*, 2005, 15 (2): 229-233.
LIU Chang-chun, XIA Han-ping, JIAN Shu-guang, et al. Sewage treatment in constructed wetland of multi-layer plants configuration[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 15 (2): 229-233.
- [6] Knight R L. Wildlife habitat and public use benefits of treatment wetlands[J]. *Water Science and Technology*, 1997, 35 (5): 35-43.
- [7] 吴建强, 丁玲. 不同植物的表面流人工湿地系统对污染物的去除效果[J]. *环境污染与防治*, 2006, 28 (6): 432-434.
WU Jian-qiang, DING Ling. Study on treatment of polluted river water using pilot-scale surface flow constructed wetlands system[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2006, 28 (6): 432-434.
- [8] 山文辉, 刘淑媛, 钱晓燕. 水生经济植物净化受污染水体研究[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2002 (1): 99-102.
SHAN Wen-hui, LIU Shu-yuan, QIAN Xiao-yan. A study on polluted water body purification with economical aquatic plants[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2002 (1): 99-102.
- [9] 崔卫华, 卢少勇, 陈亮, 等. 人工湿地中植物的作用与选择原则[J]. *化工之友*, 2006 (6): 51-52.
CUI Wei-hua, LU Shao-yong, CHEN Liang, et al. The role and screen principle of plants in constructed wetland[J]. *Friend of Chemical Industry*, 2006 (6): 51-52.
- [10] 蒋跃平, 葛滢, 岳春雷, 等. 人工湿地植物对观赏水中氮磷去除的贡献[J]. *生态学报*, 2004, 24 (8): 1718-1723.
JIANG Yue-ping, GE Ying, YUE Chun-lei, et al. Nutrient removal role of plants in constructed wetland on sightseeing water[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24 (8): 1718-1723.
- [11] 何池全, 赵魁义. 石菖蒲净化富营养化水体的研究[J]. *南昌大学学报(理科版)*, 1999, 23 (1): 73-76.
HE Chi-quan, ZHAO Kui-yi. A study on decontaminating eutrophic water with *Acorus tatarinowii*[J]. *Journal of Nanchang University (Natural Science)*, 1999, 23 (1): 73-76.
- [12] 国家环保总局. 水与废水监测分析方法编委会. 水与废水监测分析方法(第四版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
National EPA. Analysis method of water and waste water (Fourth Edition) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.

- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析 (第 3 版) [M]. 北京 中国农业出版社, 2000.
BAO Shi-dan. Agro-chemical analysis of soil (Third Edition) [M]. Beijing China Agricultural Press, 2000.
- [14] Pantip K, Suwanchai N. Constructed treatment wetland: a study of eight plant species under saline conditions[J]. *Chemosphere*, 2005 (8) : 585-593.
- [15] 尹 伟, 李培军, 裴巧俊. 植物吸收在人工湿地去除氮磷中的贡献[J]. *生态学杂志*, 2006, 25 (2) : 218-221.
YIN Wei, LI Pei-jun, QIU Qiao-jun. Contribution of macrophyte assimilation in constructed wetland to nitrogen and phosphorous removal[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25 (2) : 218-221.
- [16] 蒋跃平, 葛 滢, 岳春雷, 等. 轻度富营养化水人工湿地处理系统中植物的特性[J]. *浙江大学学报 (理学版)*, 2005, 32 (3) : 309-313.
JIANG Yue-ping, GE Ying, YUE Chun-lei, et al. Characteristics of plants in constructed wetland treating light eutrophic water[J]. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 2005, 32 (3) : 309-313.
- [17] Hosoi Y, Kido Y, Miki M, et al. Field examination on reed growth, harvest and regeneration for nutrient removal[J]. *Water Science and Technology*, 1998, 38 (1) : 351-359.
- [18] Debusk T A, James E P, Reddy K R. Use of aquatic and terrestrial plants for removing phosphorus from dairy wastewaters[J]. *Ecology Engineering*, 1995 (5) : 371-393.
- [19] Janjit I, Su W Y, Jae S R. Nutrient removals by 21 aquatic plants for vertical free surface-flow (VFS) constructed wetland[J]. *Ecological Engineering*, 2007 (29) : 287-293.
- [20] 胡勇有, 王 鑫, 张太平, 等. 用低浓度生活污水筛选适用于华南人工湿地的植物[J]. *华南理工大学学报 (自然科学版)*, 2006, 34 (9) : 111-116.
HU Yong-you, WANG Xin, ZHANG Tai-ping, et al. Screening of plants in constructed wetland with low-concentration domestic wastewater in South China[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2006, 34 (9) : 111-116.
- [21] Cooper P F, Green B. Reed bed treatment systems for Sewage treatment in the united kingdom-the first 10years' experience[J]. *Water Science and Technology*, 1995, 32 (3) : 317-327.
- [22] Vymazal J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 380 : 48-65.
- [23] Tanner C C. Plants for constructed wetland treatment system-A comparison of growth and nutrient uptake of eight emergent species[J]. *Ecological Engineering*, 1996, 7 (1) : 59-83.
- [24] 何池全, 叶居新. 石菖蒲 (*Acorus tatarinowii*) 克藻效应的研究[J]. *生态学报*, 1999, 19 (5) : 754-758.
HE Chi-quan, YE Ju-xin. Inhibitory effects of *Acorus tatarinowii* on algae growth[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19 (5) : 754-758.

中国学术期刊综合引证年度报告 (2008)

据中国科学技术信息研究所最新公布的 2007 年中国科技论文统计分析报告显示,《农业环境科学学报》的影响因子为 1.388,总被引频次 2882 次,在环境与安全类学术期刊(共 74 种)排名中分列第八位和第五位。引用刊数为 318 种,作者来自于 27 个地区的 164 个机构,国家自然科学基金及重大项目论文比例为 89%。

