

乡土水生植物对富营养化水体的净化效果研究

徐蕾^{1,2}, 陈思宇³, 谢东升^{1,4}, 庄萍¹, 王发国^{1*}, 邢福武¹

(1. 中国科学院华南植物园, 中国科学院植物资源保护与可持续利用重点实验室, 广东省应用植物学重点实验室, 广州 510650; 2. 中国科学院大学, 北京 10049; 3. 中山大学, 广州 510275; 4. 仲恺农业工程学院, 广州 510225)

摘要: 为了解乡土水生植物净化富营养化水体的效果, 研究了广东地区 5 种乡土水生植物对 2 种富营养化水体总氮(TN)、总磷(TP)的净化效果和植物的生长状况。结果表明, 与无植物空白相比, 5 种乡土植物使低、高浓度水体的 TN 去除率分别提高了 3.8%~13.3%和 13.2%~17.1%, TP 去除率分别提高了 15.2%~22.1%和 11.3%~57.6%, 其中野荸荠(*Eleocharis plantagineiformis*)适用于净化低氮水体; 酸模叶蓼(*Polygonum lapathifolium*)适用于高氮水体; 三白草(*Saururus chinensis*)适用于低磷水体; 菱角(*Trapa komarovii*)适用于低氮或高磷水体; 水龙(*Ludwigia adscendens*)对 2 种水体均有较好的净化效果, 对高磷水体效果极佳。5 种乡土植物在低、高浓度水体中均旺盛生长, 水龙的生物量净增长率分别达 375.5%和 539.8%, 表现最优, 其次为菱角; 水葫芦(*Eichhornia crassipes*)则在高浓度水体中腐烂死亡, 加重了水体污染。水龙、菱角对污染物的吸收作用较强, 对 P 的吸收能力显著优于其他植物($P < 0.05$)。因此, 5 种乡土植物均可作为广东地区富营养化水体修复的备选植物, 其中水龙和菱角的开发潜力最大。

关键词: 水生植物; 富营养化水体; 氮; 磷; 水体净化

doi: 10.11926/jtsb.4047

Purification of Eutrophic Water by Native Aquatic Plants

XU Lei^{1,2}, CHEN Si-yu³, XIE Dong-sheng^{1,4}, ZHUANG Ping¹, WANG Fa-guo^{1*}, XING Fu-wu¹

(1. Key Laboratory of Plants Resources Conservation and Sustainable Utilization, Guangdong Provincial Key Laboratory of Applied Botany, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 10049, China; 3. Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 4. Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China)

Abstract: In order to understand the purifying effect of native aquatic plants on eutrophic water, five representative native aquatic plants in Guangdong Province were selected with *Eichhornia crassipes* as a control for studying the removal rate of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and the growth and absorption ability of six plants in two kinds of eutrophic water were also studied. The results showed that the TN removal rate of 5 native plants in low and high polluted water increased 3.8%–13.3% and 13.2%–17.1% compared with the blank control, while TP removal rate increased 15.2%–22.1% and 11.3%–57.6%, respectively. *Eleocharis plantagineiformis* was suitable for purifying low nitrogen water, while *Polygonum lapathifolium* for high nitrogen water. *Saururus chinensis* was suitable for low phosphorus water, while *Trapa komarovii* for low nitrogen or high phosphorus water. *Ludwigia adscendens* was suitable for the two kinds of eutrophic water and had excellent purification effect for high phosphorus water. All 5 native plants could grow vigorously in low and high eutrophic water and the net growth rate of biomass of *Ludwigia adscendens* reached up to 375.5% and 539.8%, respectively, showing the best, followed by

收稿日期: 2019-01-28 接受日期: 2019-03-28

基金项目: 广东省自然科学基金项目(2015A030308015); 广东省科技计划项目(2015A020220011)资助

This work was supported by Natural Science Foundation in Guangdong (Grant No. 2015A030308015), and the Planning Project for Science and Technology in Guangdong Province (Grant No. 2015A020220011).

作者简介: 徐蕾(1993~), 女, 硕士研究生, 研究方向为水生植物资源。E-mail: xulei@scbg.ac.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: wangfg@scbg.ac.cn

Trapa komarovii. But the control plant *Eichhornia crassipes* decayed and died under high polluted water, which aggravated water pollution. *Ludwigia adscendens* and *Trapa komarovii* had perfect absorption effect on pollutants, and the TP absorption capacity was better than that of other plants ($P < 0.05$). So, it was suggested that all of five native plants could be used as alternative plants for the restoration of eutrophic water in Guangdong, among them *Ludwigia adscendens* and *Trapa komarovii* had excellent development potentiality.

Key words: Aquatic plant; Eutrophic water; Nitrogen; Phosphorus; Water purification

由水中氮、磷等营养元素含量过高导致的富营养化现象已成为全球性的环境问题, 据统计全球有75%以上、我国已有60%以上的封闭型水体处于富营养化状态^[1-2], 富营养化水中藻类异常繁殖, 水体透明度和溶解氧含量降低, 鱼虾等水生生物大量死亡, 生态系统遭到严重破坏, 并进一步加剧了水资源短缺的危机, 其治理与修复成为当前环境领域的重点和难点。目前, 国内相关修复工程中植物的选择主要侧重于短期的净化效果, 较少顾及观赏价值和生态经济效益, 故所选用的多为外来植物, 如水葫芦(*Eichhornia crassipes*)、大藻(*Pistia stratiotes*)、粉绿狐尾藻(*Myriophyllum aquaticum*)等^[3], 这些植物难以管控, 易在野外泛滥成灾, 破坏原有生态系统平衡, 对环境造成严重危害^[4]。而发达国家的水体修复将治污与植物的景观效果、文化内涵和长远的生态利益融为一体^[5]。

我国乡土水生植物资源丰富, 种类繁多^[5], 具有较高的生态安全性与景观文化本土性^[6], 其中不乏兼具观赏价值和水体修复潜力的种类, 开发乡土水生植物对于减少外来植物对环境造成的入侵危害意义重大。张文明^[7]报道太湖土著植物黄花水龙(*Ludwigia peploides* subsp. *stipulacea*)的除氮能力是水葫芦的2.9倍, 除磷能力是水葫芦的0.7倍, 可在实践中替代水葫芦净化水体。但目前各地对乡土水生植物资源重视不足, 有关其净水功能与实践应用的报道较少。本文对广东省水生植物资源进行了全面调查^[8], 结合植物的野外生境、居群状态、景观特性和潜在利用价值, 选取具有代表性的5种乡土水生植物为研究对象, 探究其对富营养化水体的净化效能, 为工程实践提供参考, 同时为我国生态文明建设做贡献。

1 材料和方法

1.1 供试植物和水体

以水龙(*Ludwigia adscendens*)、菱角(*Trapa natans*)、三白草(*Saururus chinensis*)、野荸荠(*Eleo-*

charis plantagineiformis)和酸模叶蓼(*Polygonum lapathifolium*)共5种乡土水生植物为研究对象, 以外来植物水葫芦作为植物对照。所有试验植物均采自广东省四会市下茆镇。

供试水体为原位采集的实际污水, 分低、高2个浓度等级。低浓度水体采自四会市下茆镇某污染河流, 总氮(TN)含量为5.3~6.2 mg L⁻¹, 总磷(TP)为0.51~0.70 mg L⁻¹, 属严重富营养化水体^[9]; 高浓度水体采自四会市下茆镇某养猪场排污塘, TN含量为22.1~30.2 mg L⁻¹, TP为4.5~6.1 mg L⁻¹, 属异常富营养化水体^[9]。

1.2 方法

试验于2018年5-7月在温室中进行, 自然光照, 夜间气温25℃, 日间气温33℃, 平均日照13 h。

试验前期将野外采集的健康植株在自来水中驯养7 d, 并于试验开始前用自来水洗涤, 再用蒸馏水润洗3次, 自然风干15 min后称量植物鲜质量。试验设置了5个乡土植物、水葫芦对照和只有污水无植物的空白对照7个处理, 每处理3个重复。培养容器为600 mm×500 mm×300 mm的PVC水箱, 每箱盛装污水75 L, 培养水生植物200 g。定期添加蒸馏水至试验初始水位。

水样于水培前1 d和水培后第15、30、45、60天用聚乙烯容器采集, 每次200 mL, 当天上午7点采样并在48 h内完成相关测定。收割的植物样品用蒸馏水洗净后立即在105℃下杀青, 65℃下烘干, 测量植物的氮、磷含量。水体TN用TOC总有机碳分析仪测定, TP用钼酸铵分光光度法(GB 11893-1989)测定, 植株TN和TP含量采用浓H₂SO₄-H₂O₂消解法^[10]测定。

1.3 数据分析

采用Excel 2016软件统计数据, R-3.4.3软件作图并对数据进行统计分析和差异显著性检验(Duncan法)。水体中TN、TP去除率为 η_1 , 植物TN、

TP 净去除率为 η_2 ，水生植物对 TN、TP 的吸收贡献率为 η_3 ，水生植物生物量净增长率为 η_4 ，计算公式如下： $\eta_1=(C_1Q_1-C_2Q_2)/C_1Q_1 \times 100\%$ ； $\eta_2=\eta_1(PG)-\eta_1(BC)$ ； $\eta_3=(P_2-P_1)/(C_1Q_1-C_2Q_2) \times 100\%$ ； $\eta_4=(W_2-W_1)/W_1 \times 100\%$ ，式中： C_1 、 C_2 和 Q_1 、 Q_2 分别表示水样的起始、终止浓度(mg L^{-1})和水量(L)； PG 、 BC 分别表示植物和空白对照； P_1 、 P_2 分别表示试验起始、终止时水生植物的氮、磷总量(mg)； W_1 、 W_2 分别表示试验起始、终止时的植物鲜质量(mg)。

2 结果和分析

2.1 对水体中氮的去除效果

从图 1 可知，污水中 TN 的净化效果受植物种类、污染物浓度和水力停留时间影响；切断外源污染后，水体 TN 自净能力较强。试验前期，各处理 TN 含量下降迅速。处理 15 d 低浓度下空白对照水体 TN 去除率达 61.2%，三白草、野荸荠、水葫芦与其差异不大；酸模叶蓼、菱角和水龙则显著高于空白对照($P<0.05$)，使水体 TN 去除率提高了 7.1%~12.1%。各处理在高浓度和低浓度下对 TN 的净化效果存在一定差异，高浓度下空白对照水体 TN 去除率为 41.3%，水葫芦为 24.1%，5 种乡土植物处理则显著高于空白对照($P<0.05$)，使 TN 去除率提高了 30.8%~41.9%。

水葫芦和空白对照的 TN 去除率因污水浓度差

异较大。5 种乡土植物在 2 种水体中均表现为前 15 d 去除率快速增加，随后整体呈缓慢上升趋势，并于第 45 天达到最大值，此后，部分植物处理效果略有下降，但与第 60 天的差异不大。

从表 1 可见，试验结束时(60 d)，低、高浓度下空白对照水体 TN 去除率均较高，分别为 60.5%和 72.2%，种植植物后水体 TN 去除性能得到不同程度提升。低浓度下水葫芦、菱角、野荸荠、水龙、三白草、酸模叶蓼分别使水体 TN 去除率提高了 19.0%、13.3%、12.7%、11.8%、7.9%和 3.8%。高浓度下酸模叶蓼、菱角、野荸荠、水龙、三白草、水葫芦的 TN 去除率分别提高了 17.1%、16.6%、15.9%、15.3%、13.2%和 3.8%。净化效果因植物种类和污水浓度而差异显著($P<0.05$)，低浓度污水中水葫芦的净化效果最好，高浓度污水中酸模叶蓼的最好，菱角、野荸荠、水龙对 2 种水体均有较好的净化效果，可作为广东地区富营养化水体 TN 去除的备选植物。

2.2 对水体中磷的去除效果

从图 2 可知，污水中 TP 的净化效果也受植物种类、污染物浓度和水力停留时间影响；切断外源污染后，水体 TP 自净能力较强。处理 15 d，低浓度下空白对照水体 TP 去除率为 55.1%，酸模叶蓼、三白草与其差异不大；其余 4 种植物则显著高于空白对照($P<0.05$)，使水体 TP 去除率提高了 18.4%~28.0%。

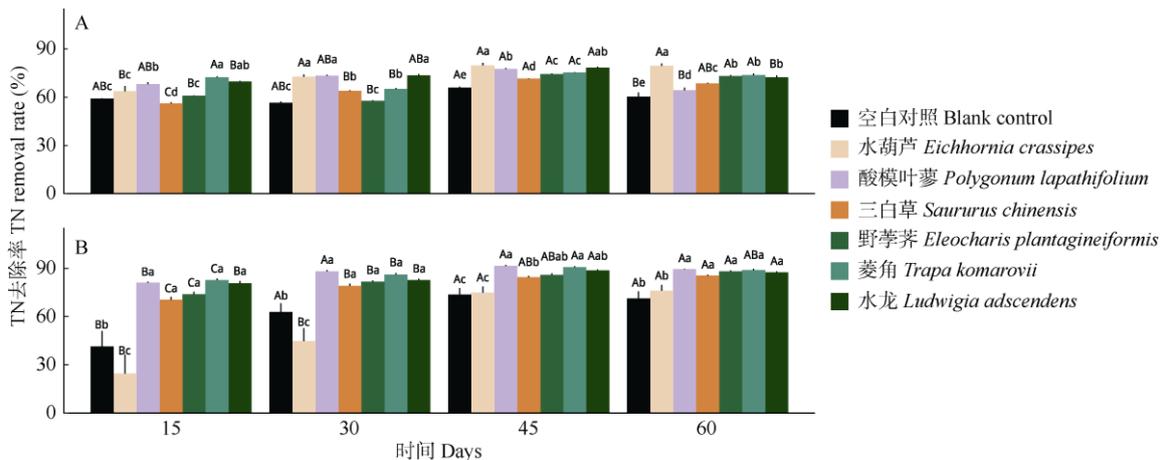


图 1 TN 去除率的动态变化。A: 低浓度污水; B: 高浓度污水。柱上不同小写字母表示相同采样时间不同处理间差异显著，不同大写字母表示相同处理不同时间差异显著。下同。

Fig. 1 Dynamic changes in TN removal rate. A: Low concentration sewage; B: High concentration sewage. Different small letters upon column indicate significant difference at 0.05 level the same sampling time among different treatment, while different capital letters indicate significant difference at 0.05 level with the same treatment among different sampling time. The same is following Figures.

表 1 水体总氮和总磷 60 d 后的净去除率

Table 1 Net removal rate of total nitrogen and phosphorus in water after 60 days

	总氮净去除率 Net removal rate of total nitrogen /%		总磷净去除率 Net removal rate of total phosphorus /%	
	低 Low	高 High	低 Low	高 High
三白草 <i>Saururus chinensis</i>	7.9c	13.2a	21.6b	11.3c
酸模叶蓼 <i>Polygonum lapathifolium</i>	3.8d	17.1a	17.9bc	19.9b
野荸荠 <i>Eleocharis plantagineiformis</i>	12.7b	15.9a	15.3c	23.4b
菱角 <i>Trapa komarovii</i>	13.3b	16.6a	15.2c	50.4a
水龙 <i>Ludwigia adscendens</i>	11.8b	15.3a	22.1b	57.6a
水葫芦 <i>Eichhornia crassipes</i>	19.0a	3.8b	28.0a	-11.5d

同一数据后不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。下表同。

Different small letters within column indicate significant difference at 0.05 level. The same is following Table.

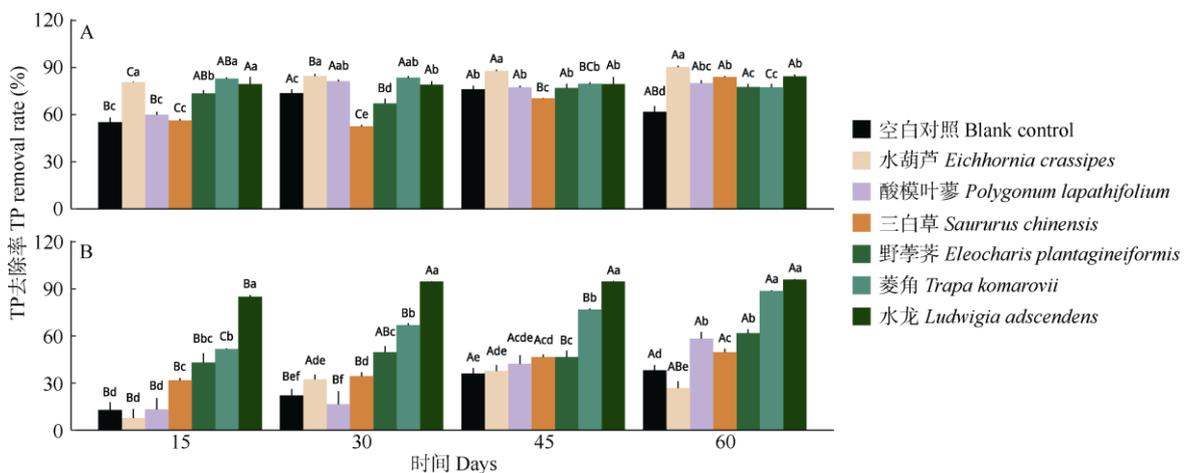


图 2 TP 去除率的动态变化。A: 低浓度污水; B: 高浓度污水。

Fig. 2 Dynamic changes in TP removal rate. A: Low concentration sewage; B: High concentration sewage.

不同处理在高浓度和低浓度下对 TP 的净化效果差异较大,高浓度下空白对照水体 TP 去除率为 13.1%, 酸模叶蓼为 13.7%, 水葫芦仅 7.8%; 其余 4 种植物处理显著高于空白对照($P < 0.05$), 使水体 TP 去除率提高了 25.0%~71.1%, 其中水龙优势极为明显。

低浓度污水中不同处理对 TP 达到最佳净化效果的时间不同,菱角为 15 d, 酸模叶蓼为 30 d, 空白对照组为 45 d, 水葫芦、三白草、野荸荠和水龙则为 60 d。高浓度污水中除水葫芦在 45 d 后去除率开始下降外, 其余处理的 TP 去除率均在 60 d 达最高。

从表 1 可知, 试验结束时(60 d), 低、高浓度下空白对照水体 TP 去除率分别为 62.2%和 38.3%, 种植植物后水体 TP 去除性能得到不同程度提升。低浓度下水葫芦、水龙、三白草、酸模叶蓼、野荸荠和菱角分别使水体 TP 去除率提高了 28.0%、22.1%、21.6%、17.9%、15.3%和 15.2%。高浓度污水中水龙、菱角、野荸荠、酸模叶蓼、三白草分别使 TP 去除率提高了 57.6%、50.4%、23.4%、19.9%和 11.3%。

而水葫芦的则下降了 11.5%。各处理净化效果因植物种类和水体浓度差异显著($P < 0.05$), 低浓度污水中水葫芦的净化效果最好, 水龙和三白草次之, 高浓度污水中水龙、菱角远优于其他植物, 可作为广东地区富营养化水体 TP 去除的备选植物。

2.3 植物生物量净增长率和吸收贡献率变化

5 种乡土水生植物在污水中均生长良好, 且水体营养盐浓度越高, 植物生长越旺盛, 生物量增长越快。水葫芦则在高浓度污水中出现生长异常, 从第 20 天开始茎叶和根系逐渐变白, 生长停滞, 并进一步腐烂死亡。植物生物量净增长率受植物种类和水体污染程度影响, 低浓度污水中植物生物量净增长率为 59.2%~375.5%, 以水龙最高, 水葫芦次之, 三白草最低; 高浓度污水中植物生物量净增长率为 0.24%~539.8%, 以水龙最高, 菱角次之, 水葫芦最低。可见, 水龙对 2 种水体的适应力强, 生物量增长最快, 菱角次之。

表 2 植物生物量净增长率和吸收贡献率

Table 2 Net growth rates of biomass and absorption contribution rate of plants

	生物量净增长率 /%		吸收贡献率 Absorption contribution rate /%			
	Net growth rate of biomass		总氮 Total nitrogen		总磷 Total phosphorus	
	低 Low	高 High	低 Low	高 High	低 Low	高 High
三白草 <i>Saururus chinensis</i>	59.2f	87.7e	15.4c	13.6c	20.6c	19.1d
酸模叶蓼 <i>Polygonum lapathifolium</i>	88.5e	121.7d	12.1c	13.2c	18.7d	18.8d
野荸荠 <i>Eleocharis plantagineiformis</i>	121.9d	182.2c	30.3b	24.7b	29.7a	26.0c
菱角 <i>Trapa komarovii</i>	207.8c	385.9b	34.8b	36.9a	24.1b	34.5b
水龙 <i>Ludwigia adscendens</i>	375.5a	539.8a	41.5a	40.6a	20.6c	43.5a
水葫芦 <i>Eichhornia crassipes</i>	312.9b	0.2f	40.9a	-3.5d	23.7b	-7.4e

植物的吸收贡献率是指植物通过吸收作用去除的氮、磷含量占水中污染物去除总量的比例,受植物种类和水体污染程度影响。低浓度污水中植物对 N 的吸收贡献率为 15.4%~41.5%,以水龙最强,水葫芦次之,酸模叶蓼最低;高浓度污水中植物对 N 的吸收贡献率为-3.5%~40.6%,以水龙最强,菱角次之,水葫芦最低;酸模叶蓼、菱角的为低浓度<高浓度,三白草、野荸荠、水龙和水葫芦的为低浓度>高浓度。对于 TP,低浓度污水中植物对 P 的吸收贡献率为 18.7%~29.7%,以野荸荠最强,菱角次之,酸模叶蓼最低;高浓度污水中植物对 P 的吸收贡献率为-7.4%~43.5%,以水龙最强,菱角次之,水葫芦最低;酸模叶蓼、菱角、水龙表现为低浓度<高浓度。三白草、野荸荠、水葫芦表现为低浓度>高浓度。水龙、菱角在 2 种水体中对 TN、TP 均有较好的富集能力。

3 结论和讨论

本研究结果表明,乡土水生植物的辅助修复有利于去除富营养化水体的氮磷元素,其净化效果受植物种类、污染物浓度和水力停留时间影响。切断外源污染后,天然水体具有较强的自净功能,水生植物的存在能进一步提升水体的氮磷去除性能,这与前人^[11-12]的研究结果一致。本研究中,处理 60 d 后低、高浓度污水中空白对照的 TN 去除率分别为 60.5%和 72.2%,TP 去除率分别为 62.2%和 38.3%,高于大多数人工配置污水的模拟试验^[13-14],这可能是因为本试验实际污水中微生物的种类和数量较为丰富,水体中的氮元素一部分通过沉淀去除,另一部分主要通过与微生物活动密切相关的氨化、硝化和反硝化作用去除,这也与前人^[15-17]的研究结果一致。磷循环属沉积型循环,不能像氮一样以气体的

形式挥发,水中的磷主要通过颗粒态磷的机械沉积,溶解态磷与水中固体悬浮物吸附沉淀和与钙、镁、铝等阳离子结合沉淀等途径去除^[18]。本试验选用的 5 种乡土植物对富营养化水体均有一定的净化效果,在空白对照的基础上使低、高浓度污水的 TN 去除率分别提高了 3.8%~13.3%和 13.2%~17.1%,TP 分别提高了 15.2%~22.1%和 11.3%~57.6%。植物一方面吸收水中的氮、磷元素;另一方面植物的存在丰富了水体生物多样性,提高了水生态系统抵抗力稳定性,改善了水体环境,促进了其他因素对氮、磷的去除。植物根系的泌氧功能可促进硝化细菌、反硝化细菌等根际微生物的生长代谢,加速污染物的分解^[19-20]。

有研究指出植物的吸收作用对水中氮、磷的去除贡献较小,约占 2%~6%^[21-23],但蒋跃平^[24]研究了 17 种植物对氮、磷的吸收,分别占水中污染物总去除量的 46.8%和 51.0%。本试验的 5 种乡土植物对低、高浓度污水中 TN 的吸收贡献率分别为 12.1%~41.5%和 13.2%~40.6%;对 TP 的吸收贡献率分别为 18.7%~29.7%和 18.8%~43.5%;其中水龙、菱角的吸收作用较强,对高浓度污水中 TP 的吸收贡献远高于其他植物。植物的吸收贡献率受植物种类和水体污染程度影响,在不考虑研究背景的情况下直接评价植物的吸收作用存在一定的片面性。Brix^[19]和 Peterson^[25]的研究也表明,植物在低负荷人工湿地中对氮、磷的吸收贡献十分明显,在高负荷系统中的作用较为有限。在利用水生植物净化富营养化水体过程中,可通过植物吸收作用将水中的污染物转移至植物体内,再通过收割植物的方式从水中移除。

水生植物的净增生物量是决定植物水质净化能力的一个重要因素^[26]。本研究中植物生物量增长越快,其水质净化效果越明显。60 d 内,水龙在低、

高浓度水体中生物量分别增长了3.7和5.4倍, 其所在水体低浓度下氮、磷去除率大于72.0%, 高浓度下大于87.0%, 水龙生物量增长速度明显高于其它植物且综合水质净化效果最好。蒋跃平^[24]也通过研究表明可直接以生物量为指标选择适合的净水植物。因此, 在水体生态修复的相关工程实践中, 可优先考虑生物量大, 生长快的乡土水生植物。

不同植物对污染物的耐受能力不同。本试验的5种乡土水生植物在2种水体中都生长良好, 但外来植物水葫芦在高浓度水体中腐烂死亡, 其所在水体氮、磷去除率分别为-3.5%和-7.4%, 反而加重了水体污染。万志刚等^[27]的人工模拟试验表明水葫芦的氮、磷致死浓度分别为1514.26和200.4 mg L⁻¹, 远高于本试验的高浓度污水, 这说明本研究中氮、磷含量不是水葫芦的致死因素, 具体原因需进一步研究。水葫芦作为水生态相关工程中的常用植物, 其生态风险需进一步评估。当前关于植物净化效果的研究多在人工配置的污水中进行, 与实际水体存在较大差异, 并且水环境较为复杂, 工程实践中选用植物时需查阅文献资料、借鉴他人经验的基础上用待修复水体进行预试验, 避免植物生长不适而大面积死亡对水体造成二次污染。

本试验的5种乡土水生植物对富营养化水体均有一定的净化效果。其中野荸荠适用于净化低氮水体; 酸模叶蓼适用于高氮水体; 三白草适用于低磷水体; 菱角适用于低氮或高磷水体; 水龙对2种水体均有较好的净化效果, 对高磷水体效果极佳。这些植物同时具有较高的经济价值和景观效果, 其中水龙生物量大生长快, 易成片生长形成景观且收割后可作优良的动物饲料, 菱角可供食用, 三白草全草入药且文化内涵丰富, 花期顶端叶片变白, 适于营造独特的水体景观。在今后广东地区富营养化水体治理中可结合污水特征和景观需求合理地选用以上植物, 进一步促进环境保护与经济和谐发展。

参考文献

- [1] van BEUSEKOM J E E. Eutrophication [M]// SALOMON M, MARKUS T. Handbook on Marine Environment Protection: Science, Impacts and Sustainable Management. Cham: Springer, 2018: 429-445. doi: 10.1007/978-3-319-60156-4_22.
- [2] SONG C, LIU P, ZHU H, et al. Research of purification effect on eutrophic water by *Oenanthe javanica* [J]. J Hydroecol, 2011, 32(3): 145-148. doi: 10.3969/j.issn.1003-1278.2011.03.027.
- [3] YANG M, WU X G, ZHANG W H, et al. Application of aquatic plant in ecological restoration of eutrophic water [J]. Environ Sci Technol, 2007, 30(7): 98-102. doi: 10.3969/j.issn.1003-6504.2007.07.036.
- [4] QIN Z Y, TAO J Y, HU C, et al. Distribution, influence and control measures of *Eichhornia crassipes* in China [J]. J Anhui Agric Sci, 2016, 44(28): 81-84. doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2016.28.026.
- [5] CHEN Y D, MA X T, DU Y F, et al. The Chinese Aquatic Plants [M]. Zhengzhou: Henan Science and Technology Press, 2012: 10-32, 450-478.
- [6] TANG Z S. Application and analysis of native plants in landscaping [J]. Xiandai Hort, 2018(10): 144-145. doi: 10.14051/j.cnki.xdyy.2018.20.120.
- [7] ZHANG W M. Purifying effect and mechanism of hydrophytes in eutrophic water [D]. Nanjing: Hehai University, 2007: 11-32.
- [8] YUAN X C, ZHANG W W, WANG F G, et al. Current status and conservation strategies of wetland plants in Guangdong Province, China [J]. Plant Sci J, 2018, 36(2): 211-220. doi: 10.11913/PSJ.2095-0837.2018.20211.
- [9] SUN C. Study on the purification ability of hydrophytes to water environment of urban lakes [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2008: 12-13.
- [10] BAO S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 147-149, 168-169.
- [11] SU F, LI Z A, LI Y W, et al. Purification efficiency of eutrophic water

- by several aquatic plants [J]. *Adv Environ Protect*, 2018, 8(5): 436–446. doi: 10.12677/aep.2018.85054.
- 苏丰, 李志安, 李应文, 等. 几种水生植物及其组合对模拟污水的净化效果 [J]. *环境保护前沿*, 2018, 8(5): 436–446. doi: 10.12677/aep.2018.85054.
- [12] TANG X Q, LI J Z, LI X J, et al. Research on seven hydrophytes' removal effect on nitrogen and phosphorus in eutrophic water [J]. *J Subtrop Resour Environ*, 2007(2): 8–14. doi:10.19687/j.cnki.1673-7105.2007.02.002.
- 汤显强, 李金中, 李学菊, 等. 7 种水生植物对富营养化水体中氮磷去除效果的比较研究 [J]. *亚热带资源与环境学报*, 2007(2): 8–14. doi:10.19687/j.cnki.1673-7105.2007.02.002.
- [13] WEI D H, ZHANG J T, WEI X Z. N and P removal from eutrophicated water with four hydrophytes [J]. *Chin Wild Plant Res*, 2012, 31(5): 12–17. doi: 10.3969/j.issn.1006-9690.2012.05.0003.
- 魏东慧, 张江汀, 魏学智. 4 种水生植物对富营养化水体氮磷去除效果的研究 [J]. *中国野生植物资源*, 2012, 31(5): 12–17. doi: 10.3969/j.issn.1006-9690.2012.05.0003.
- [14] DAI S, LI D W. Removal efficiency of eight plants in two different eutrophic water [J]. *J NE For Univ*, 2016, 44(7): 80–83. doi: 10.3969/j.issn.1000-5382.2016.07.017.
- 戴汕, 李庆卫. 8 种植物对 2 种质量浓度富营养化水体的净化效果 [J]. *东北林业大学学报*, 2016, 44(7): 80–83. doi: 10.3969/j.issn.1000-5382.2016.07.017.
- [15] LIU Z P, LIU S J. Advances in the molecular biology of nitrifying microorganisms [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2004, 10(4): 521–525. doi: 10.3321/j.issn:1006-687X.2004.04.028
- 刘志培, 刘双江. 硝化作用微生物的分子生物学研究进展 [J]. *应用与环境生物学报*, 2004, 10(4): 521–525. doi: 10.3321/j.issn:1006-687X.2004.04.028.
- [16] CHANG H Q. Effectiveness and mechanisms of remediating eutrophic water body using aquatic plant-microbe integrated system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006: 80–83.
- 常会庆. 水生植物和微生物联合修复富营养化水体试验效果及机理研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006: 80–83.
- [17] REDDY K R, DEBUSK T A. State-of-the-art utilization of aquatic plants in water pollution control [J]. *Water Sci Technol*, 1987, 19(10): 61–79. doi: 10.2166/wst.1987.0098.
- [18] WANG Z Q, LIU C G, QIAO G J. Effect of nitrogen and phosphorus cycling characteristic on eutrophication of water body [J]. *South-to-North Water Transfers Water Sci Technol*, 2010, 8(6): 82–85.97. doi: 10.3724/SP.J.1201.2010.06082.
- 王振强, 刘春广, 乔光建. 氮、磷循环特征对水体富营养化影响分析 [J]. *南水北调与水利科技*, 2010, 8(6): 82–85.97. doi: 10.3724/SP.J.1201.2010.06082.
- [19] BRIX H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? [J]. *Water Sci Technol*, 1997, 35(5): 11–17. doi: 10.1016/S0273-1223(97)00047-4.
- [20] WU X L. Mechanism of wastewater treatment in constructed wetlands [J]. *Environ Sci*, 1995, 16(3): 83–86. doi: 10.13227/j.hjcx.1995.03.024.
- 吴晓磊. 人工湿地废水处理机理 [J]. *环境科学*, 1995, 16(3): 83–86. doi: 10.13227/j.hjcx.1995.03.024.
- [21] HADAD H R, MAINE M A, BONETTO C A. Macrophyte growth in a pilot-scale constructed wetland for industrial wastewater treatment [J]. *Chemosphere*, 2006, 63(10): 1744–1753. doi: 10.1016/j.chemosphere.2005.09.014.
- [22] McJANNET C L, KEDDY P A, PICK F R. Nitrogen and phosphorus tissue concentrations in 41 wetland plants: A comparison across habitats and functional groups [J]. *Funct Ecol*, 1995, 9(2): 231–238. doi: 10.2307/2390569.
- [23] LI J N, HU R L, WU X F, et al. Nitrogen and phosphorus removal capacity of plant species in constructed wetlands for treating municipal wastewater [J]. *Environ Poll Control*, 2007, 29(7): 506–509. doi: 10.3969/j.issn.1001-3865.2007.07.008.
- 李建娜, 胡曰利, 吴晓芙, 等. 人工湿地污水处理系统中的植物氮磷吸收富集能力研究 [J]. *环境污染与防治*, 2007, 29(7): 506–509. doi: 10.3969/j.issn.1001-3865.2007.07.008.
- [24] JIANG Y P, GE Y, YUE C L, et al. Nutrient removal role of plants in constructed wetland on sightseeing water [J]. *Acta Ecol Sin*, 2004, 24(8): 1718–1723. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2004.08.019.
- 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. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2004.08.019.
- [25] PETERSON S B, TEAL J M. The role of plants in ecologically engineered wastewater treatment systems [J]. *Ecol Eng*, 1996, 6(1/2/3): 137–148. doi: 10.1016/0925-8574(95)00055-0.
- [26] JIN S Q, ZHOU J B, ZHU X L, et al. Comparison of nitrogen and phosphorus uptake and water purification ability of ten aquatic macrophytes [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2010, 29(8): 1571–1575.
- 金树权, 周金波, 朱晓丽, 等. 10 种水生植物的氮磷吸收和水质净化能力比较研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(8): 1571–1575.
- [27] WAN Z G, GU F G, SUN B Y, et al. Analysis of the resistance of six aquatic vascular plants to nitrogen and phosphorus [J]. *Freshwat Fish*, 2006, 36(4): 37–40. doi: 10.3969/j.issn.1000-6907.2006.04.009.
- 万志刚, 顾福根, 孙丙耀, 等. 6 种水生维管束植物对氮和磷的耐受性分析 [J]. *淡水渔业*, 2006, 36(4): 37–40. doi: 10.3969/j.issn.1000-6907.2006.04.009.