

3种浮萍对富营养化水体的修复

谢 朦¹ 张 飞¹ 章莹颖¹ 秦 霄¹ 马 炯¹ 肖 忻² 成家杨^{1*}

(1. 北京大学深圳研究生院环境与能源学院, 深圳 518055; 2. 中国科学院过程工程研究所, 北京 100190)

摘 要 选用 *Spirodela polyrhiza*、*Lemna aequinoctialis* 和 *Landoltia punctata* 3种太湖浮萍为实验对象, 在实验室条件下, 研究其生长状况及其对模拟太湖水体的净化效果。结果表明, 3种浮萍对水体总氮、氨氮、硝氮和总磷都具有很好的净化效果, *S. polyrhiza*、*L. aequinoctialis* 和 *L. punctata* 对总氮的去除率分别为 80.3%、73.7% 和 83.8%, 对总磷的去除率分别为 98.8%、96.4% 和 99.3%, 但对有机物的去除作用比较有限。除营养吸收外, 浮萍的水质净化能力还表现在对水中环境因子的影响, 3种浮萍都能够维持水体 pH 在 4.6~6.5 的范围内以适合自身生长, 并能够在一定程度上增加水体的溶解氧含量。硝化和反硝化作用是氮去除的主要途径, 由于水体溶解氧含量较高, 促进了好氧反硝化作用的进行。相比于 *S. polyrhiza* 和 *L. aequinoctialis*, *L. punctata* 具有较强的水体净化效果和生长速度, 是净化太湖富营养化水体的理想水生植物。

关键词 浮萍 太湖 富营养化水体 修复

中图分类号 X52 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2016)05-2447-07 DOI 10.12030/j.cjee.201412076

Effect of three duckweed species on remediation of eutrophic water

Xie Meng¹ Zhang Fei¹ Zhang Yingying¹ Qin Xiao¹ Ma Jiong¹ Xiao Xin² Cheng Jiayang¹

(1. School of Environment and Energy, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China;

2. Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract Three Tai Lake local duckweed species, *Spirodela polyrhiza*, *Lemna aequinoctialis*, and *Landoltia punctata*, were investigated for the feasibility of their treatment of eutrophic water under lab conditions. The results showed that the duckweed species had obvious removal ability of the total nitrogen (TN), ammonium ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), nitrate ($\text{NO}_3^-\text{-N}$), and total phosphorus (TP). The removal rates of TN by *S. polyrhiza*, *L. aequinoctialis* and *L. punctata* were 80.3%, 73.7% and 83.8%, respectively, and the removal rates of TP were 98.8%, 96.4% and 99.3%, respectively. However, there was limited removal efficiency of chemical oxygen demand (COD). Besides nutrient removal, duckweed affected the characteristics of the tested water in several aspects, such as maintaining pH between 4.6 and 6.5 for better growth conditions, and enhancing the dissolved oxygen (DO) level. Nitrification and denitrification processes were the major mechanisms for nitrogen removal, and aerobic denitrification may play a crucial role due to a high DO level in the tested water. Compared with *S. polyrhiza* and *L. aequinoctialis*, *L. punctata* grew better under the eutrophic conditions and achieved a higher removal efficiency, which suggests that *L. punctata* is the better species for eutrophic water treatment in Tai Lake.

Key words duckweed; Tai Lake; eutrophic water; remediation

太湖流域地处长江三角洲南缘, 水域面积 2 338 km^2 ^[1], 是我国第三大淡水湖。作为流域内最重要的水源, 太湖担负着周边大中城市的供水, 以及改善下游地区水质状况的重要作用, 多年来其水质状况一直受到广泛关注。自 20 世纪 80 年代起, 由于工业排污、生活垃圾等诸多原因, 太湖水质及其生态环境出现了一定程度的恶化。依据《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) 评价, 2012 年太湖流域省界河流 32 个水质监测断面中, V 类和劣于 V 类分别占 18.8% 和 56.2%, 污染较严重; 全湖总体水质评价为 V 类, 属中度富营养化^[2]。为保证太湖流域水资

源的持续利用, 实现水体富营养化的有效控制和修复已成为各方关注的焦点。

近年来, 水生植物被广泛应用于净化氮磷污水, 表现出较好的应用前景。浮萍科植物作为一种常见的小型浮叶植物, 能分解、吸收、转化氮、磷等营养物

基金项目: 深圳市新兴产业重点资助项目 (JC201104210118A); 国家海洋公益性行业科研专项资助 (201305022)

收稿日期: 2014-12-08; **修订日期:** 2015-02-17

作者简介: 谢朦 (1990—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 水污染治理。

E-mail: xmxiemeng@126.com

* 通讯联系人, E-mail: chengjy@pku.sz.edu.cn

质,具有优越的生长性能和广泛的应用价值。当前,对浮萍科植物的研究,主要集中在以下几方面:(1)浮萍最佳生长条件的探索及其生长模型的研究^[3-5];(2)浮萍在水污染治理中的应用及优质浮萍品种的筛选^[6-7];(3)浮萍对重金属的吸收和富集^[8-9];(4)浮萍资源化利用^[10-11]。大多数水污染治理研究将浮萍用于处理畜禽废水及生活污水,较少用于自然水体的富营养化修复,而且本文针对自然水体的富营养化特性,将 pH 及水体溶解氧等环境因子的变化和氮磷及有机物的去除效果结合起来分析,对富营养化水体的研究尤为重要。

对此,本文从太湖采集水样和浮萍样品,在实验室条件下通过模拟实验研究 3 种浮萍品种对水体总氮(TN)、氨氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、总磷(TP)和 COD 的去除效果,并观测水体溶解氧和 pH 的变化,以期了解不同种浮萍净化水质的能力及特点,从而筛选出适合太湖流域水体修复的浮萍种质,并初步研究其除氮机理,为应用于实际富营养化水体修复提供参考。

1 材料与方法

1.1 浮萍培养

实验选用 3 种浮萍,均取自太湖流域,具体坐标为($31^\circ 27' 05.65'' \text{ N}$, $120^\circ 19' 26.47'' \text{ E}$)、($31^\circ 25' 49.78'' \text{ N}$, $120^\circ 17' 15.65'' \text{ E}$)和($31^\circ 27' 50.16'' \text{ N}$, $120^\circ 05' 43.62'' \text{ E}$),经基因测序鉴定为紫萍(*Spirodela polyrrhiza*),青萍(*Lemna aequinoctialis*)和少根紫萍(*Landoltia punctata*)^[12]。实验前将浮萍置于 Hoagland 完全培养液中驯化培养 2 周,待其生物量扩增后挑选健康植株,经自来水漂洗去除污垢和杂质后使用。

1.2 实验用水的来源及水质

对采集到的太湖水样进行分析,测定其 N、P、COD 含量后,对驯化浮萍使用的 Hoagland 培养液进行修正,使其 N、P 和有机物含量与太湖水质状况相近用以进行后续实验,其余营养元素浓度不变。修正后的培养液水质为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 2.96 mg/L, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 4.60 mg/L, TN 8.86 mg/L, TP 0.98 mg/L, COD 22 mg/L, pH 6.5, 处于湖泊中度和重度富营养化水平之间。

1.3 实验方法

容量 300 mL 的不透光烧杯,加入 200 mL 实验污水。从前期驯化培养的浮萍,挑选健康的植株,按 70% 左右的表面覆盖率投放到实验容器(鲜重投放量 0.4 g)。每种浮萍培养 30 杯,并以不加浮萍的水样为对照,所有处理均置于实验室内光线均一处培养、观察。

实验期间光强 3 500 ~ 4 000 lx(每日光照 16 h),温度 25 ~ 30 °C。隔天采样,测定浮萍生物指标和水质指标。实验过程中每天用蒸馏水补充容器中蒸发掉的水分。

1.4 测定方法

1.4.1 水样测定

pH 采用电位法;溶解氧测定采用溶解氧检测仪;硝酸盐氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)测定采用氨基磺酸紫外分光光度法;氨氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)测定采用纳氏试剂分光光度法;TN 测定采用碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法;TP 测定采用过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法;COD 测定采用重铬酸钾法^[13]。

1.4.2 浮萍植物样品的测定

鲜重、干重测定:用滤水网斗将浮萍从水中捞起,滤去自由水(无水滴出现),将待测的浮萍平铺在吸水卫生纸垫上,吸水 5 min 后,用精度为 0.01 g 的电子天平称重。测定鲜重后,将浮萍置于 65 °C 烘箱内烘 24 h,称干重。

浮萍含氮量的测定:浮萍植物样品经过浓 $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}_2$ 消化后,用凯氏定氮仪测定植物体含氮量^[14]。

1.4.3 数据处理和统计分析方法

计算公式有以下几个:

$$\text{RE} = (C_0 - C_t) / C_0 \quad (1)$$

营养元素的去除率(removal efficiency, RE), C_0 为初始时刻营养元素浓度(mg/L), C_t 为 t 时刻营养元素浓度(mg/L)。

$$\text{RGR} = (\ln W_t - \ln W_0) / t \quad (2)$$

浮萍相对生长率(relative growth rate, RGR), W_0 为初始时刻浮萍生物量(mg), W_t 为 t 时刻浮萍生物量(mg), t 为种群增长时间(d)。

$$t_2 = \ln 2 / \text{RGR} \quad (3)$$

浮萍生物量倍增时间 t_2 ,是指浮萍生物量增加 1 倍的时间。

$$N_{\text{输入}} = N_{\text{吸收}} + N_{\text{其他途径去除}} + N_{\text{残留}} \quad (4)$$

实验体系 N 平衡(balance of nitrogen), $N_{\text{输入}}$ 为输入的总 N 量(mg), $N_{\text{吸收}}$ 为浮萍吸收的 N 素量(mg), $N_{\text{其他途径去除}}$ 为其他因素去除的 N 素量(mg), $N_{\text{残留}}$ 为残留在水体中的总 N 量(mg)。

实验数据用 Excel 2007 和 SPSS 20 软件进行统计分析($p < 0.05$),用 Origin 9.0 软件作图。

2 实验结果

2.1 水体中氮含量的变化

3 种浮萍都能够有效去除水中的总氮、氨氮和硝态氮,在一定的时间范围内,处理时间越长去除效

果越好。

作为喜铵水生植物,3种浮萍对氨氮去除效率较高,均达到98%以上(图1)。前4天,氨氮浓度迅速下降,*S. polyrhiza*、*L. aequinoctialis*和*L. punctata*日平均去除率分别为24.7%、20.3%和24.3%,从第7天开始氨氮浓度变化趋缓,至实验结束时,实验组水体氨氮浓度均为0.02~0.03 mg/L。

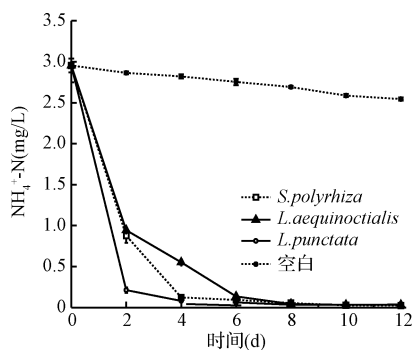


图1 不同浮萍品种对水体 NH_4^+ -N 的去除效果

Fig. 1 Removal efficiency of ammonium by different duckweed species

3种浮萍对硝态氮呈现出了不同的吸收规律(图2)。实验前2天,*L. punctata*将硝态氮含量从4.60 mg/L降低到2.68 mg/L,去除率达到41.8%,但同期,*S. polyrhiza*和*L. aequinoctialis*对水体硝态氮的影响较小,结合图1和图2可以看出,实验第4天,氨氮浓度较低时,*S. polyrhiza*和*L. aequinoctialis*实验组的硝态氮浓度才开始下降。这表明,*S. polyrhiza*和*L. aequinoctialis*在实验初期利用硝态氮的能力很弱,当 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N同时存在时,优先选择利用 NH_4^+ -N,直到水体中 NH_4^+ -N浓度降低到一定水平后,才吸收 NO_3^- -N,这与Oron^[15]的研究结果一致,而*L. punctata*能够同时利用 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N。实验结束时,*S. polyrhiza*、*L. aequinoctialis*

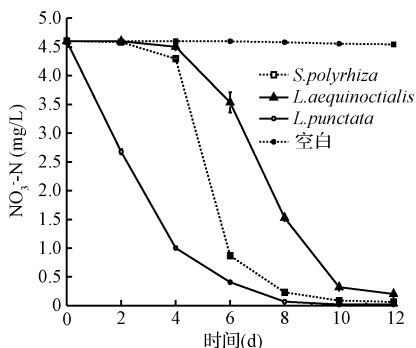


图2 不同浮萍品种对水体 NO_3^- -N 的去除效果

Fig. 2 Removal efficiency of nitrate by different duckweed species

和*L. punctata*对 NO_3^- -N的去除率分别为98.5%、95.6%和99.5%,均表现出了较好的去除效果。

不同浮萍品种对水体TN的影响如图3所示,3种浮萍对TN的去除作用从大到小依次是*L. punctata* > *S. polyrhiza* > *L. aequinoctialis*。去除率分别达到83.8%、80.3%和73.7%,其中*L. punctata*对TN去除率显著高于*S. polyrhiza*和*L. aequinoctialis*,这主要是由于*L. punctata*从实验一开始就对 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N有很高的吸收效率。水体经*L. punctata*处理12 d后,TN浓度为1.4 mg/L,达到地表水环境质量总氮Ⅲ类标准(GB 3838-2002)。

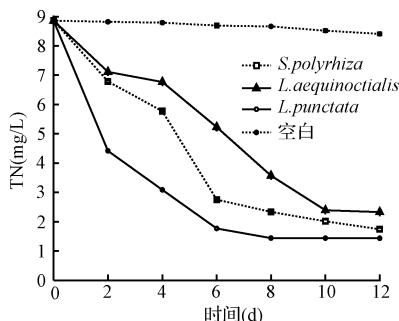


图3 不同浮萍品种对水体 TN 的去除效果

Fig. 3 Removal efficiency of total nitrogen by different duckweed species

此外,空白对照组在实验结束时, NH_4^+ -N的去除率达到13.9%,远高于 NO_3^- -N的1.2%,其原因可能是因为水体中存在硝化细菌将氨氮转化为硝态氮,以及 NH_3 挥发作用提高了氨氮的去除率。而且空白对照没有浮萍覆盖,透光率高,有少量藻类繁殖,导致氨氮被藻类吸收利用。

2.2 水体中磷的去除效果

水体中磷的去除一方面是以磷酸盐沉降并固结在悬浮物上,另一方面是可溶性磷被植物和藻类、微生物吸收^[16]。在实验前期TP浓度大幅度降低(图4),后期趋于平稳,3个处理规律基本相同。*S. polyrhiza*、*L. aequinoctialis*和*L. punctata*分别在实验第12天、第10天和第10天达到TP最大去除效率,分别为98.8%、96.2%和99.3%,此时水中TP浓度为0.01、0.04和0.006 mg/L,均达到地表水环境质量标准(GB 3838-2002)总磷Ⅰ类水平。对照组TP的去除率为6.8%,显著低于各实验组TP的去除率,可见浮萍的吸收和吸附作用是TP去除的主要途径。结合图3和图4可知,第10天时,水体中的TP几乎消耗殆尽,浮萍对TN的去除速率也开始显著降低,这可能是由于水体中TP浓度低,氮磷比例不适宜对浮萍生长产生了不利影响,从而影响

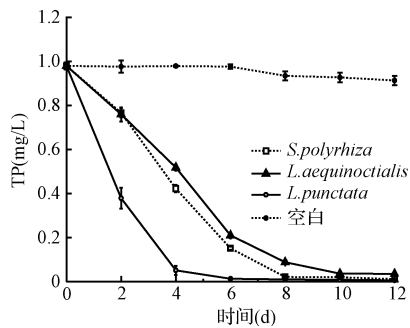


图 4 不同浮萍品种对水体 TP 的去除效果

Fig.4 Removal efficiency of total phosphorus by different duckweed species

了浮萍对 TN 的去除,沈根祥^[17]在其文章中也提到了这一点。

2.3 水体中有机物的去除效果

水体中 COD 含量随时间的推移逐渐下降,从第 5 天开始趋于稳定,实验结束时,接种了浮萍的水体 COD 含量明显低于空白对照(图 5),说明 3 种浮萍能够降低水体 COD 浓度,但相对于氮磷等无机物,浮萍对有机物的净化效果比较有限。前 4 天, *S. polyrhiza*、*L. aequinoctialis* 和 *L. punctata* 对 COD 的净化效率较高,去除率分别是 21.5%、21.1% 和 24.3%,随后去除率降低,当 COD 的浓度低于 16 mg/L 时,浮萍对有机物的去除速率明显减慢,日平均去除率小于 1%。实验结束时,COD 去除率分别为 *S. polyrhiza* 24.7%,*L. aequinoctialis* 23.5% 以及 *L. punctata* 27.6%,均小于 30%。

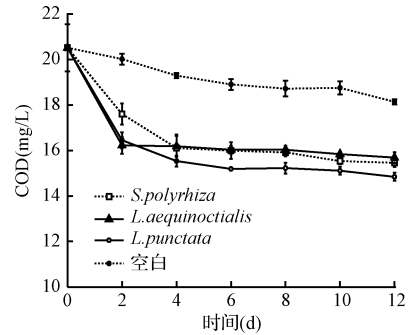


图 5 不同浮萍品种对水体有机物的去除效果

Fig.5 Removal efficiency of COD by different duckweed species

水生植物对有机废水的净化主要是通过吸附、吸收、体内降解和体外微生物代谢等途径来完成^[18],其中,微生物的作用最为明显。有研究表明,大部分有机物的降解是靠厌氧微生物群落来完成的^[16,19],但本实验水体较浅,而且为人工模拟污水,系统中主要存在少量好氧或兼性微生物群落,对有机污染物的降解能力有限。黄辉^[20]的研究曾发现,

少根紫萍在平均气候条件下对 COD 的去除率达到 83.9%,其 COD 初始浓度为 530.4 mg/L,当 COD 浓度低于 50 mg/L 后,再下降就比较困难。由此结合本实验情况,由于水体本身 COD 浓度较低,而且厌氧微生物不够丰富,因此对 COD 的降解效率较低。

2.4 对水体 pH、DO 的影响

李文朝^[21]的研究表明,除营养吸收之外,水生植物的水质净化功能还表现在对水中多种环境因子的综合影响,如 DO、pH 值、化感物质等。

各实验组水体 pH 随时间呈现先下降后上升的趋势(表 1),并且保持在 4.6~6.5 范围内。在实验开始阶段,由于浮萍对氨氮的吸收以及硝化细菌的硝化作用水体 pH 显著降低^[22],*L. aequinoctialis* 的 pH 下降程度最剧烈,从 6.43 降低到 4.69。而后,水体 pH 值逐步上升,这可能与少量藻类生长对水体产生碱化作用^[23]有关,但由于浮萍生物量增长迅速,基本覆盖水面,藻类生长因缺乏光照受到抑制,因此这种碱化作用被控制在一定的程度内,表现在 pH 值上升速率减小,并趋于稳定。实验结束时,3 种浮萍处理的水体 pH 均在 5.8 左右,属于适宜浮萍生长的 pH 值范围^[24-25]。

表 1 不同浮萍品种水体中 pH 的变化

Table 1 Changes of pH in wastewater cultivated with different duckweed species

时间 (d)	pH		
	<i>S. polyrhiza</i>	<i>L. aequinoctialis</i>	<i>L. punctata</i>
0	6.43	6.43	6.43
2	4.94	4.82	5.00
4	4.85	4.69	5.84
6	5.69	5.03	6.41
8	6.08	5.94	6.36
10	5.94	5.71	5.97

与对照组水体溶解氧相比,实验组水体溶解氧呈现出了一定的波动性。接种 *S. polyrhiza*、*L. aequinoctialis* 和 *L. punctata* 的水体分别在第 6 天,第 8 天和第 6 天达到溶解氧最高值,分别为 6.87、6.73 和 7.1 mg/L,统计分析发现,显著高于对照组,是对照组的 1.05、1.04 和 1.09 倍,此时浮萍的覆盖密度分别为 181.1、177.6 和 203.6 g/m²,由此可见,浮萍具有一定的增氧作用(表 2)。但从第 10 天开始,各实验组中水体溶解氧逐渐降低,其主要原因是由于浮萍生长过剩而导致密度过大,阻碍了空气中的氧气向水中扩散,而且实验后期浮萍由于叠层生长,下层浮萍无法进行光合作用,从而减少对水体溶解氧的供给。水中溶解氧的高低主要取决于水生植物的

生长活动^[26]。总的来说,3 种浮萍中 *L. punctata* 的增氧效果最好,*S. polyrhiza* 次之。

表 2 不同浮萍品种水体中溶解氧的变化
Table 2 Changes of DO in wastewater cultivated with different duckweed species

时间 (d)	DO (mg/L)			
	<i>S. polyrhiza</i>	<i>L. aequinoctialis</i>	<i>L. punctata</i>	空白
0	6.52	6.5	6.51	6.54
2	6.77	6.6	6.9	6.53
4	6.83	6.63	7.07	6.53
6	6.87	6.67	7.1	6.5
8	6.87	6.73	7.1	6.5
10	6.87	6.7	7.07	6.53
12	6.83	6.67	7.07	6.51

2.5 浮萍的生长情况

在初始叶片覆盖面积为 30.8 cm² 的情况下,经过 14 d 的实验处理,3 种浮萍都形成了一定规模的种群,并覆盖了整个水面。说明浮萍净化水体的同时,其生物量也得到了 一定的积累。*L. punctata* 的鲜重从 104 g/m² 增加到 431 g/m²,增加了 4 倍,*S. polyrhiza*增加了 3.6 倍,*L. aequinoctialis* 增加了 3.1 倍(图 6)。*S. polyrhiza*、*L. aequinoctialis* 和 *L. punctata* 的鲜重相对生长速率 RGR 分别为 0.09、0.08 和 0.1,鲜重倍增时间 *t*₂ 分别为 7.58、8.54 和 6.83。3 种浮萍干重增长趋势与各自的鲜重增长趋势基本一致,*L. punctata* 增加了 5.1 倍,*S. polyrhiza* 增加了 4.1 倍,*L. aequinoctialis* 增加了 3.7 倍。无论是鲜重还是干重,*L. punctata* 的生长速度都大于 *S. polyrhiza* 和 *L. aequinoctialis*。

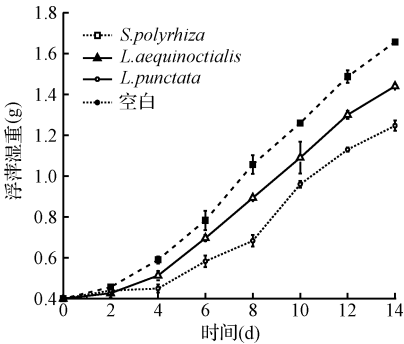


图 6 不同种浮萍鲜生物量增长动态

Fig. 6 Growth curves of different duckweed species

3 讨 论

3.1 除氮能力

浮萍 *S. polyrhiza*、*L. aequinoctialis* 和 *L. puncta-*

ta 对实验水体总氮的最大去除率分别为 80.3%、73.7% 和 83.8%,对总磷的最大去除率分别为 98.8%、96.4% 和 99.3%,与总磷的去除效果相比,不同浮萍对氮的去除能力差别较大。大量研究表明,不同水生植物对氮的吸收去除能力是有差异的。水生高等植物可划分为沉水植物、浮水植物和挺水植物等类型,不同类型的水生植物有着不同的净化功能。方焰星等^[26]研究了一些沉水植物和挺水植物对氮的净化效果,发现经过 7 周的实验,沉水植物金鱼藻、眼子菜和穗状狐尾藻对总氮的去除率分别为 83.7%、65.51% 和 79.69%,挺水植物石菖蒲和香菇草对总氮的去除率分别为 86.22% 和 91.13%,浮萍作为浮水植物,在较短的时间内能够达到近似的去除效率,可能是由于浮萍相比于上述提及的挺水植物和沉水植物,与水面的接触面积更大,生长繁殖速度快,具有更高效的吸收同化营养物质的能力。

本实验选用的 3 种浮萍分别属于紫萍属、青萍属以及少根紫萍属,3 种浮萍呈现出除氮能力的差异可能源于其不同的生理生态特性和属间差异,*L. punctata*根系发达,叶片紧凑厚实,*L. aequinoctialis* 根长但数量较少,叶片数量也相对较少,这可能导致了不同种浮萍对营养物质吸收能力的差异。

3.2 除氮机理

氮的去除方式较多,除了植物的吸收同化,还有微生物和藻类的分解吸收,以及氨挥发等。本实验通过分析各途径的氮含量以探究浮萍在除氮过程中发挥的作用。实验结束时,3 种浮萍生物体内的含 N 量测定结果为,*S. polyrhiza* 23.5 g/kg,*L. aequinoctialis* 22.1 g/kg,*L. punctata* 26.7 g/kg。从表 3 可知,3 种浮萍通过吸收利用去除的氮只占不到 20%。其他途径可能包括:NH₃ 挥发、硝化和反硝化作用以及藻类吸收等^[27],但从本实验溶液 pH 值变化来看,pH 值维持在 4.8~6.5,溶液中 N 素通过氨挥发去除的可能性不大,主要去除途径应该是微生物硝化反硝化作用,以及少量藻类的吸收作用。在以大型水生植物为核心的污水处理系统中,Reddy 等^[28]的研究发现,相比植物的吸收作用,硝化和反硝化作用仍然是主要的氮去除机制,约占 40%~92%。Vermaat 等^[16]也在浮萍净化水体的研究中有类似发现,水体中 50% 的氮由硝化反硝化作用去除。与此同时,本实验监测到培养液中溶解氧浓度较高(约 >6 mg/L),与传统理论上严格厌氧的反硝化过程环境条件不符。然而从 20 世纪 80 年代以

来,越来越多的研究表明,由于好氧反硝化菌以及好氧反硝化酶系的存在,促进了好氧反硝化作用的进行^[29]。国内外的诸多研究发现,实际工程中存在好氧条件下的脱氮现象,并且有多种好氧反硝化菌被发

现和筛选^[30]。于爱茸等分离得到一株好氧反硝化细菌(*Bacillus*),其在好氧条件下去除率高达 85% 以上^[31]。由此推测,好氧反硝化作用在本实验中也发挥了一定的作用,使水体中的 TN 得到有效的降低。

表 3 不同浮萍品种 N 平衡

Table 3 Nitrogen balances summarized for treatment with different duckweed species							
浮萍品种	N 输入 (mg)	N 残留 (mg)	N 残留 占百分比(%)	N 吸收 (mg)	N 吸收 占百分比(%)	N 其他途径去除 (mg)	N 其他途径去除 占百分比(%)
<i>S. polyrhiza</i>	1.77	0.35	20	0.32	18	1.10	62
<i>L. aequinoctialis</i>	1.77	0.47	26	0.20	12	1.10	62
<i>L. punctata</i>	1.77	0.29	16	0.26	15	1.22	69

水体中残留的 TN,可能是由于实验中后期浮萍出现了叶状体发黄变软的老化现象,死亡的植物体释放自身 N 素等物质进入水体,增加了水体的 N 浓度。虽然数据表明浮萍吸收并不是去除水体 N 素的最主要作用,但浮萍为微生物提供了生存环境,有利于微生物作用,间接提高了水体的净化效率。这与 Körner 等^[32]的研究结果类似。

4 结 论

3 种浮萍均能很好地吸收水中的营养物质,经统计学分析发现,*L. punctata* 对环境的适应能力更强,相同条件下脱氮除磷的效果更好,而且在增加水体溶解氧、稳定 pH、以及生物量积累方面都显著优于另外两种浮萍,在 3 种浮萍中最适合净化太湖水体。如果按 0.1 kg/m² 的投放密度,将 *L. punctata* 大范围接种到太湖水体用于富营养化修复,不仅可以显著降低水体的富营养化程度,而且 2 周后,每公顷可以收获至少 0.36 t 的浮萍干物质。用于水体富营养化修复后的浮萍具有较高的蛋白质含量或者淀粉含量,可以作为动物饲料和生物燃料的补充物,进行后续资源化利用。

但由于实验室内静水条件与实际太湖水生环境相比存在一定的差异,后续有必要进行野外实验,以检测浮萍净化富营养化水体的实际效果。

参 考 文 献

[1] 陆铭锋,徐彬,杨旭昌.太湖水质评价计算方法及近年来水质变化分析.水资源保护,2008,24(5):30-33
Lu Mingfeng, Xu Bin, Yang Xuchang. Evaluation method for water quality of Taihu Lake and its variation in recent years. Water Resources Protection, 2008, 24(5): 30-33 (in Chinese)
[2] 太湖流域水资源保护局.太湖流域及东南诸河省界水

体水资源质量状况通报.经济日报,2012-07-20(08)
[3] Aziz A., Kochi M. N. K. Growth and morphology of *Spirodela polyrhiza* and *S. punctata* (Lemnaceae) as affected by some environmental factors. Bangladesh Journal of Botany, 1999, 28(2): 133-138
[4] Caicedo J. R., Van der Steen N. P., Arce O., et al. Effect of total ammonia nitrogen concentration and pH on growth rates of duckweed (*Spirodela polyrrhiza*). Water Research, 2000, 34(15): 3829-3835
[5] 种云霄,胡洪营,钱易.细脉浮萍和紫背浮萍在污水营养条件下的生长特性.环境科学,2004,25(6):59-64
Chong Yunxiao, Hu Hongying, Qian Yi. Growth feature of biomass of *Lemna aequinoctialis* and *Spirodela polyrrhiza* in medium with nutrient character of wastewater. Environmental Science, 2004, 25(6): 59-64(in Chinese)
[6] Bergmann B. A., Cheng J., Classen J., et al. Nutrient removal from swine lagoon effluent by duckweed. Transactions of the ASAE, 2000, 43(2): 263-269
[7] Bergmann B. A., Cheng J., Classen J., et al. In vitro selection of duckweed geographical isolates for potential use in swine lagoon effluent renovation. Bioresource Technology, 2000, 73(1): 13-20
[8] Rahman M. A., Hasegawa H., Ueda K., et al. Arsenic uptake by aquatic macrophyte *Spirodela polyrhiza* L.: Interactions with phosphate and iron. Journal of Hazardous Materials, 2008, 160(2-3): 356-361
[9] Appenroth K. J., Krech K., Keresztes á., et al. Effects of nickel on the chloroplasts of the duckweeds *Spirodela polyrhiza* and *Lemna minor* and their possible use in bio-monitoring and phytoremediation. Chemosphere, 2010, 78(3): 216-223
[10] Baliban R. C., Elia J. A., Floudas C. A., et al. Thermochemical conversion of duckweed biomass to gasoline, diesel, and jet fuel: Process synthesis and global optimization. Industrial & Engineering Chemistry Research,

- 2013, 52(33): 11436-11450
- [11] Cui W., Xu J., Cheng J. J., et al. Starch accumulation in duckweed for bioethanol production. *Biological Engineering Transactions*, **2011**, 3(4): 187-197
- [12] Tang Jie, Zhang Fei, Cui Weihua., et al. Genetic structure of duckweed population of *Spirodela*, *Landoltia* and *Lemna* from Lake Tai, China. *Planta*, **2014**, 239(6): 1299-1307
- [13] 国家环保局. 水和废水监测分析方法. 中国环境科学出版社, **1997**
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, **2000**
- [15] Oron G. Duckweed culture for wastewater renovation and biomass production. *Agricultural Water Management*, **1994**, 26(1-2): 27-40
- [16] Vermaat J. E., Khalid Hanif M. Performance of common duckweed species (*Lemnaceae*) and the waterfern *Azolla filiculoides* on different types of wastewater. *Water Research*, **1998**, 32(9): 2569-2576
- [17] 沈根祥. 利用浮萍净化氮磷污水机理及其优化工艺条件研究. 杭州: 浙江大学博士学位论文, **2005**
Shen Genxiang. Research on mechanism and technological conditions of nitrogen-phosphorus wastewater treatment by duckweed. Hangzhou: Doctor Dissertation of Zhejiang University, **2005** (in Chinese)
- [18] 何春利. 北方地区水生植物对污染水体净化效果的研究. 北京: 中国农业大学硕士学位论文, **2006**
He Chunli. Research of decontamination of hydrophyte in northern region for the pollution water body. Beijing: Master Dissertation of China Agricultural University, **2006** (in Chinese)
- [19] Al-Nozaily F., Alaerts G., Veenstra S. Performance of duckweed-covered sewage lagoons; II. Nitrogen and phosphorus balance and plant productivity. *Water Research*, **2000**, 34(10): 2734-2741
- [20] 黄辉. 冬季浮萍放养体系对养猪场废水的处理效果. *环境科学与技术*, **2009**, 32(9): 27-31
Huang Hui. Treatment of swine wastewater by duckweed-based system under winter condition. *Environmental Science & Technology*, **2009**, 32(9): 27-31 (in Chinese)
- [21] 李文朝. 富营养水体中常绿水生植被组建及净化效果研究. *中国环境科学*, **1997**, 17(1): 53-57
Li WenZhao. Construction and purification efficiency test of an ever-green aquatic vegetation in an eutrophic lake. *China Environmental Science*, **1997**, 17(1): 53-57 (in Chinese)
- [22] Howard J. W., Cheng J., Bergmann B. A., et al. Nutrient removal from anaerobically pretreated swine wastewater with growing duckweed: Pilot study. *Transactions of the ASAE*, **2000**, 44(3): 64-70
- [23] Szabó S. L., Braun M., Borics G. Elemental flux between algae and duckweeds (*Lemna gibba*) during competition. *Archiv fur Hydrobiologie*, **1999**, 146(3): 355-367
- [24] Journey W., Skillicorn P., Spira W. Duckweed aquaculture: A new aquatic farming system for developing countries. Washington DC: Banco Mundial, **1993**
- [25] 钟云霄, 胡洪营, 钱易. pH及无机氮化合物对小浮萍生长的影响. *环境科学*, **2003**, 24(4): 35-40
Chong Yunxiao, Hu Hongying, Qian Yi. Effect of inorganic nitrogen compounds and pH on the growth of duckweed. *Environmental Science*, **2003**, 24(4): 35-40 (in Chinese)
- [26] 方焰星, 何池全, 梁霞, 等. 水生植物对污染水体氮磷的净化效果研究. *水生态学杂志*, **2010**, 3(6): 36-40
Fang Yanxing, He Chiquan, Liang Xia, et al. The purifying effect of polluted water by the aquatic plants. *Journal of Hydroecology*, **2010**, 3(6): 36-40 (in Chinese)
- [27] 周影茹, 袁晓燕, 王俊儒, 等. 太湖地区高效除氮浮萍品种的筛选及其除氮机理的初步研究. *土壤*, **2010**, 42(3): 390-397
Zhou Yingru, Yuan Xiaoyan, Wang Junru, et al. Screening duckweed (*Lemnaceae*) species for efficient removal of water-body's nitrogen in the Tai lake region and preliminary study on nitrogen removal mechanism. *Soils*, **2010**, 42(3): 390-397 (in Chinese)
- [28] Reddy K. R., Debusk T. A. State-of-the-art utilization of aquatic plants in water pollution control. *Water Science and Technology*, **1987**, 19(10): 61-79
- [29] 葛辉. 异养硝化与好氧反硝化细菌的筛选、培养及综合除氮研究. 苏州: 苏州科技学院硕士学位论文, **2011**
Ge Hui. Screening, cultivate of aerobic heterotrophic nitrification and denitrification bacteria and integrated denitrification research. Suzhou: Master Dissertation of Suzhou University of Science and Technology, **2011** (in Chinese)
- [30] Robertson L. A., Kuenen J. G. Aerobic denitrification: A controversy revived. *Archives of Microbiology*, **1984**, 139(5): 351-354
- [31] 于爱茸, 李尤, 俞吉安. 一株耐氧反硝化细菌的筛选及脱氮特性研究. *微生物学杂志*, **2005**, 25(3): 77-81
Yu Airong, Li You, Yu Jian. Denitrification of a newly isolated *Bacillus* strain W2 and its application in aquaculture. *Journal of Microbiology*, **2005**, 25(3): 77-81 (in Chinese)
- [32] Körner S., Vermaat J. E. The relative importance of *Lemna gibba* L., bacteria and algae for the nitrogen and phosphorus removal in duckweed-covered domestic wastewater. *Water Research*, **1998**, 32(12): 3651-3661