

凤眼莲和水浮莲对滇池草海水体中氮去除效果的比较研究

闻学政¹, 刘海琴¹, 张迎颖¹, 韩亚平², 秦红杰¹, 张志勇^{1*}

(1.江苏农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014; 2.昆明市滇池生态研究所, 云南 昆明 650228)

摘要:通过模拟试验,比较了凤眼莲和水浮莲2种漂浮性水生植物对滇池草海水体的去氮效果。结果表明,凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)和水浮莲(*Pistia stratiotes*)均有较强的水体去氮能力。在水体总氮(TN)、溶解性总氮(DTN)、硝态氮(NO_3^- -N)、铵态氮(NH_4^+ -N)初始平均浓度分别为8.40、7.20、4.12、2.59 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,凤眼莲和水浮莲种苗投放均为1 kg的条件下,凤眼莲和水浮莲对水体总氮(TN)、溶解性总氮(DTN)、硝态氮(NO_3^- -N)、铵态氮(NH_4^+ -N)30 d去除率平均分别为74.24%、76.81%、87.62%、80.30%和70.10%、78.89%、94.77%、87.64%。凤眼莲和水浮莲吸收作用带走的氮占水体中总氮损失量的89.39%和82.33%,凤眼莲试验组、水浮莲试验组和对照组沉积物中氮含量占水体中氮损失量比率平均分别为6.94%、11.64%和83.51%,说明凤眼莲和水浮莲能有效吸附水体中悬浮颗粒物,进而减少了水体沉积物的形成,凤眼莲、水浮莲均能显著降低水体DO及pH值。虽然凤眼莲和水浮莲均能显著降低水体的总氮浓度,但由于水浮莲植株较脆,综合考虑,故认为大规模控制性种养凤眼莲是一种治理富营养化湖泊的可行途径。

关键词:凤眼莲;水浮莲;富营养化水体;去氮效果

中图分类号:X173

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2015)04-0388-07

doi: 10.13254/j.jare.2014.0312

Comparative Studies on Nitrogen Removal Between *Eichhornia crassipes* and *Pistia stratiotes* in Lake Dianchi Caohai, China

WEN Xue-zheng¹, LIU Hai-qin¹, ZHANG Ying-ying¹, HAN Ya-ping², QIN Hong-jie¹, ZHANG Zhi-yong^{1*}

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. Kunming Institute of Ecology of Dianchi Lake, Kunming 650228, China)

Abstract: In order to compare two different floating aquatic plants about the nitrogen removal effect of eutrophic water in Lake Dianchi Caohai, *Eichhornia crassipes* and *Pistia stratiotes* were employed to microcosm experiments. Results showed that *Eichhornia crassipes* and *Pistia stratiotes* had no obvious difference on the ability of nitrogen enrichment and the total nitrogen removal rate. Under the water total nitrogen (TN), dissolved total nitrogen (DTN), nitrate (NO_3^- -N), ammonium (NH_4^+ -N) initial concentration of 8.40, 7.20, 4.12, 2.59 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, *Eichhornia crassipes* and *Pistia stratiotes* seedlings were 1 kg, the average total nitrogen (TN), dissolved total nitrogen (DTN), nitrate (NO_3^- -N), ammonium (NH_4^+ -N) removal rate of *Eichhornia crassipes* test group were 74.24%, 76.81%, 87.62%, 80.30% respectively; The average total nitrogen (TN), dissolved total nitrogen (DTN), nitrate (NO_3^- -N), ammonium (NH_4^+ -N) removal rate of *Pistia stratiotes* test group were 70.10%, 78.89%, 94.77%, 87.64% respectively. The average assimilation away from total nitrogen in water nitrogen loss rate of *Eichhornia crassipes* and *Pistia stratiotes* test group were 89.39% and 82.33% respectively. The average nitrogen content in the sediment of nitrogen in the water loss rate of *Eichhornia crassipes*, *Pistia stratiotes* and control test group were 6.94%, 11.64% and 83.51% respectively. *Eichhornia crassipes* and *Pistia stratiotes* could not only effectively inhibit the formation of sediment, but also could significantly decrease the DO and pH of the water. Although *Eichhornia crassipes* and *Pistia stratiotes* can significantly reduce the total nitrogen of water, considering the *Pistia stratiotes* plant is brittle, so large-scale *Eichhornia crassipes* planting is a feasible way to control eutrophication of lakes.

Keywords: *Eichhornia crassipes*; *Pistia stratiotes*; eutrophic water; nitrogen removal effect

收稿日期:2014-11-04

基金项目:国家“十二五”滇池水专项“滇池水体内负荷控制与水质综合改善技术研究及工程示范课题”(2012ZX07102-004-002-003)

作者简介:闻学政(1986—),男,助理研究员,主要从事污染水体植物修复研究。E-mail: 98111257@sina.com

*通信作者:张志勇 E-mail: jaaszyzhang@yahoo.cn

滇池位于云南省昆明市区,又叫昆明湖,面积 311.34 km²,湖体形状略呈弓形,海埂长堤将滇池分隔为南北两片区,北部片区即称草海,面积为 10.67 km²,南部片区即称外海,是我国西南地区最大的高原湖泊。多年来滇池草海污染严重:流入滇池的 4 条主要生活污水河(分别是新运粮河、老运粮河、大观河、西坝河)及 2 个主要生活污水处理厂出水口(分别是第一、第三污水处理厂出水口)进入草海,并且草海又处于滇池的上源,一年的纳污水量是其容积的 5.42 倍^[1]。故滇池草海的污染程度尤为严重。通过水质监测数据显示,目前滇池草海水体处于重度富营养化污染状态。随着水污染的日益加剧,高效低耗的水污染处理技术逐渐受到人们的重视,漂浮性水生植物可直接漂浮于水面生长及易于人工操纵等特点在净化水体污染、防治富营养化方面发挥了重要的作用^[2]。

凤眼莲和水浮莲为水生植物生态修复富营养化水体的 2 种经典植物。凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)又名水葫芦,属雨久花科,是一种快速生长的大型漂浮性水生植物。张志勇等^[3]研究发现凤眼莲对氮、磷等有较强的富集作用,袁蓉等^[4]、夏会龙等^[5]发现凤眼莲对无机物质和部分有机污染物也有着很强的吸收和促进降解能力。鉴于其生长快速、富集能力强的特点被认为是一种高效、廉价的污水净化植物^[6-7]。水浮莲(*Pistia stratiotes*)又名大藻、肥猪草,天南星科大藻属,性喜高温高湿,不耐严寒。由于水浮莲富集水体氮磷非常强,国内外对此很早就已经开始了相关研究^[8-11],并且水浮莲已成功地应用于城市污水和工厂排放废水^[12-13]。

本文以滇池草海污染最严重的大观河入湖口附近原位水,采用室内模拟的方法,分析和比较 2 种漂浮水生植物——凤眼莲、水浮莲对滇池草海富营养化水体氮富集和去除能力,旨在为利用这 2 种漂浮水生植物净化富营养化湖泊水体提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与地点

1.1.1 水生植物来源

在滇池草海湖体上游(25°1'11.76"N,102°39'50.58"E)选择生长健壮大小一致的凤眼莲及水浮莲幼苗,试验开始前,先用自来水清洗,然后用蒸馏水清洗幼苗。

1.1.2 供试水体与试验容器

由于草海湖体的富营养化程度自北向南逐渐降低,故供试水体取自草海北部,即草海上游大观河入

湖口附近(25°1'23.01"N,102°39'52.82"E)。试验容器为 400 L 白色塑料水箱,水箱长×宽×高为 97 cm×66 cm×76 cm。每个塑料水箱加入 380 L 供试水体,其初始水质见表 1。

表 1 试验水体的初始水质

Table 1 Initial water quality of the experiments

指标	浓度
DO/mg·L ⁻¹	10.2±2.3
pH 值	9.42±0.41
TN/mg·L ⁻¹	8.70±1.45
DTN/mg·L ⁻¹	7.20±0.42
NO ₃ ⁻ -N/mg·L ⁻¹	4.12±1.54
NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	2.59±1.82

1.1.3 试验地点

试验场地位于滇池草海西北岸的一个通风透光的挡雨棚内(24°58'11.4"N,102°38'04.5"E),四周通风,光照温度与室外温度基本一致。在试验期间,试验水体水温为 17.0~23.1 ℃范围波动。

1.2 试验设计

试验于 2012 年 6 月 9 日开始至 9 月 19 日结束。试验设置 3 个处理(凤眼莲试验组、水浮莲试验组、对照试验组),每种处理设置 3 个平行,实验周期 30 d,设 3 个重复。选择生长健壮、长势一致凤眼莲和水浮莲幼苗 1 kg 放置于盛有供试水体的塑料水箱中。试验开始及以后每隔 5 d 取 1 次水样,测定水体溶氧(DO)、水温、pH 值、总氮(TN)、NH₄⁺-N(铵态氮)、NO₃⁻-N(硝态氮)和 DTN(溶解态总氮)。试验开始及结束测定植物体内氮含量,并称取植物的生物量。由于在试验过程中,试验容器内会产生一些沉积物,因此每个重复周期试验结束收集试验容器内的沉积物,烘干称重,测定沉积物的氮含量。

1.3 分析方法

1.3.1 水体指标测定

DO、pH 值、水温采用美国 YSI professional plus 测定仪现场测定,TN(总氮)、NO₃⁻-N(硝态氮)、NH₄⁺-N(铵态氮)、DTN(溶解态总氮)采用德国 SEAL AA3 连续流动分析仪测定^[14-15]。

1.3.2 水生植物指标测定

水生植物生物量测定:采用重量法,将水生植物从水中捞起放在筛网上,直至无滴水时称重而得。

水生植物体内总氮的测定:75 ℃恒温烘干至恒重植物样后,粉碎,采用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消解法测定,测定方法详见参考文献[16]。

1.4 数据处理

所有数据均由均值±标准差表示,所有统计处理采用统计软件 SPSS 16.0,采用单因素方差比较不同试验组之间差异(LSD)检验,显著性水平设置为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 水生植物富集氮能力比较

凤眼莲吸收作用带走的氮是水浮莲的 1.13 倍(表 2)。在试验开始,水生植物试验组初始投苗量(鲜重)均为 1 kg,至采收时(第 30 d),凤眼莲生物量(鲜重)平均达到 3.07 kg,平均增长了 2.07 kg,平均增长了 207%,水浮莲生物量(鲜重)平均达到 2.49 kg,平均增长了 1.49 kg,平均增长了 149%。凤眼莲和水浮莲平均生物量增长率分别为 0.069 、 $0.050 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

表 2 水生植物富集氮能力比较
Table 2 Ability of nitrogen enrichment of two aquatic plants
(*Eichhornia crassipes* and *Pistia stratiotes*)

项目	凤眼莲	水浮莲
植物初始投放量(鲜重)/kg	1	1
采收时生物量净增加量(鲜重)/kg	2.07 ± 0.21	1.49 ± 0.19
采收时生物量净增加量(干重)/g	138.20 ± 13.44	113.85 ± 13.87
植株吸收带走的氮/g	2.19 ± 0.20	1.93 ± 0.21

2.2 水体 DO、pH 值变化

溶解氧不仅是衡量水体自净能力的重要参数,而且还是判断水生生物能否生存的一个标准。试验期间初始 DO 为 $7.9 \sim 12.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,平均为 $10.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。从图 1 可以看出,在试验周期中的第 5 d,种养水生植

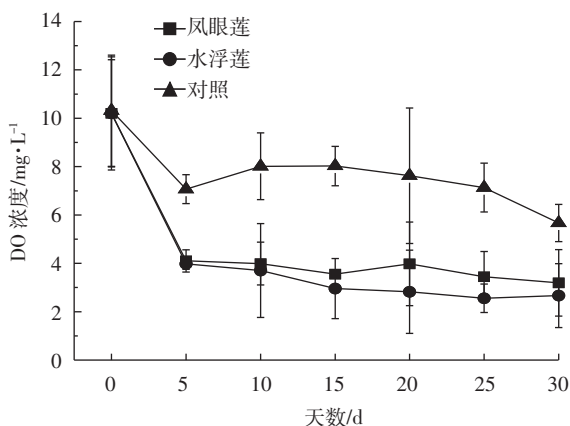


图 1 试验过程中水体溶解氧的变化

Figure 1 Changes of dissolved oxygen (DO) in the water during the experiments

物的试验组 DO 较初始下降明显,后呈现缓慢波动,凤眼莲组 DO 最低出现在试验结束时(即 30 d 时),为 $3.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。水浮莲组 DO 最低出现在第 25 d,为 $2.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。对照组 5 d 后却较初始下降不大,后呈现略上升再下降的趋势,在 30 d 时为最低为 $5.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。在试验的过程中,统计分析在 15 d 以后凤眼莲组 DO 显著高于水浮莲组($P < 0.05$),对照组 DO 均显著高于凤眼莲组和水浮莲组($P < 0.05$)。

试验期间初始 pH 值为 $9.1 \sim 9.9$ 之间,平均为 9.4。种养水生植物的试验组 pH 值均较初始下降明显(图 2),后趋于稳定,均在 $8.6 \sim 8.8$ 之间波动。对照组 pH 值在 5 d 时开始下降,后缓慢上升。统计分析凤眼莲组和水浮莲组 pH 值显著低于对照组($P < 0.05$),凤眼莲组和水浮莲组之间 pH 值差异均不显著($P > 0.05$)。

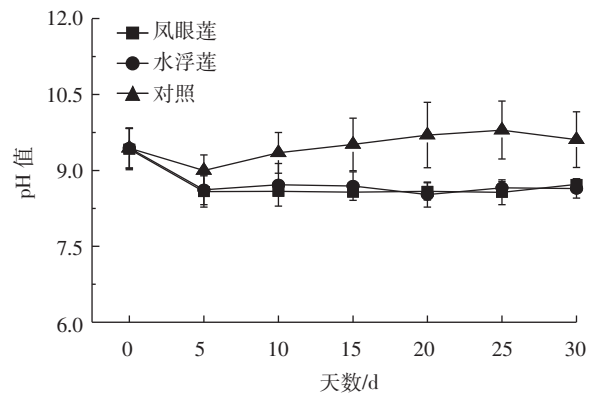


图 2 试验过程中水体 pH 值的变化

Figure 2 Changes of pH in the water during the experiments

2.3 水体 TN、DTN 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 变化

凤眼莲和水浮莲对重度富营养水体中的 TN 具有良好的去除效果(图 3)。试验期间初始 TN 浓度为 $7.67 \sim 9.71 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,平均为 $8.70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。在试验的过程中,对照试验组水体 TN 浓度变化表现为先快速下降,后下降速度放缓,最后趋于平稳,具体表现为由试验初始的 $8.70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降到最后的 $3.59 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。凤眼莲试验组 TN 变化均表现为几乎均速下降,具体表现为由试验初始的 $8.70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降到最后的 $2.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。水浮莲试验组 TN 变化表现与对照试验组的类似,具体表现为由试验初始的 $8.70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降到最后的 $2.62 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。凤眼莲与水浮莲水体 TN 30 d 去除率平均分别为 74.24% 和 70.10%。凤眼莲试验组与水浮莲试验组对水体 TN 去除能力差异不大($P > 0.05$)。凤眼莲试验组与水浮莲试验组水体 TN 浓度显著低于对照试验组($P < 0.05$)。

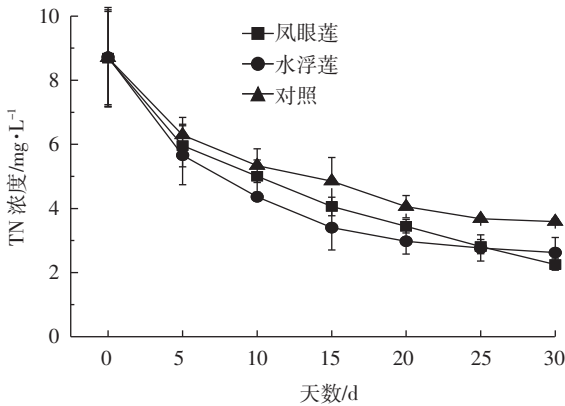


图 3 试验过程中水体总氮的变化

Figure 3 Changes of total nitrogen (TN) in the water during the experiments

凤眼莲试验组、水浮莲试验组和对照试验组之间水体的 DTN 浓度无显著差异(图 4, $P>0.05$)。试验期间初始 DTN 浓度为 $6.75\sim 7.67\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 平均为 $7.20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在试验的过程中, 不同试验组 DTN 均表现为快速下降, 几乎为一条直线下降, 凤眼莲试验组、水浮莲试验组具体表现为由初始的 $7.20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 分别下降到最后的 $1.67、1.52\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。凤眼莲与水浮莲水体 DTN 30 d 去除率平均分别为 76.81% 和 78.89%。

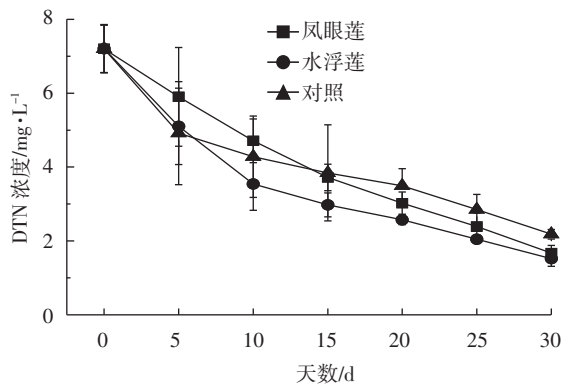


图 4 试验过程中水体溶解态总氮的变化

Figure 4 Changes of dissolved total nitrogen (DTN) in the water during the experiments

试验期间初始 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度为 $3.04\sim 5.21\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 平均为 $4.12\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。从图 5 可以看出, 在试验过程中, 凤眼莲试验组水体 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度变化表现为在第 5 d 时水体 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度有所上升, 达到 $4.91\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 后呈直线下降, 30 d 时水体 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度为 $0.51\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。水浮莲试验组水体 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度变化表现为前 5 d 缓慢下降, 然后第 5~15 d 时为水体 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度快速下降期, 最后缓慢平稳下降, 30 d 时水体 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓

度为 $0.24\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。凤眼莲、水浮莲对水体 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 30 d 降解率分别为 87.62%、94.77%。水浮莲试验组后 15 d 水体 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度显著低于对照试验组 ($P<0.05$), 但是凤眼莲试验组与对照试验组水体 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度无显著差异 ($P>0.05$)。

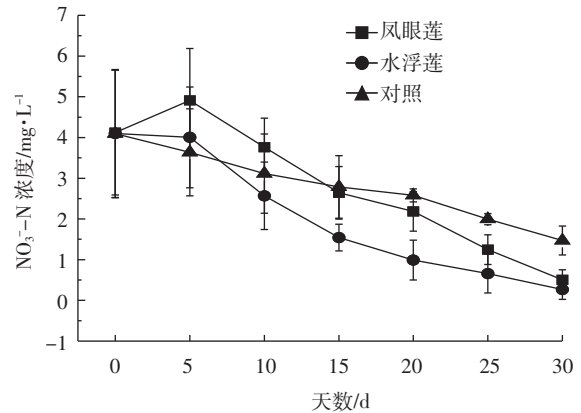


图 5 试验过程中水体硝态氮的变化

Figure 5 Changes of nitrate ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) in the water during the experiments

试验过程中各试验组之间水体 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度没有明显的差异(图 6, $P>0.05$)。试验期间初始 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为 $1.31\sim 3.87\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 平均为 $2.59\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。图 6 表示 2 种不同漂浮植物对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的吸收情况。凤眼莲试验组、水浮莲试验组水体 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度变化趋势几乎一致, 前 5 d 水体 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度分别达到了 $0.51、0.32\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 30 d 去除率分别为 80.30%、87.64%, 5 d 之后, 不同试验组呈波动变化。

2.4 试验氮平衡

凤眼莲与水浮莲去除水体中氮的效果无明显差

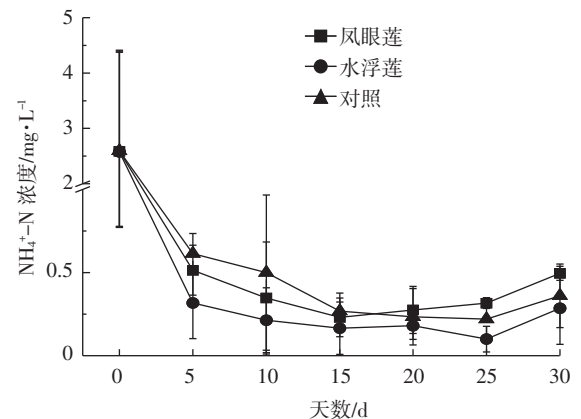


图 6 试验过程中水体铵态氮的变化

Figure 6 Changes of ammonium ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) in the water during the experiments

异(表 3, $P>0.05$), 水体总氮 30 d 去除率平均分别为 74.24% 和 70.10%。凤眼莲试验组吸收作用带走的总氮略高于水浮莲试验组。凤眼莲试验组和水浮莲试验组吸收作用带走的总氮占水体中氮损失量比率平均分别为 89.39% 和 82.33%, 凤眼莲吸收作用能力略高于水浮莲。水生植物试验组水体的主要除氮途径为吸收作用。

表 3 凤眼莲、水浮莲和对照试验组氮平衡计算

Table 3 Nitrogen balance calculation in *Eichhornia crassipes*, *Pistia stratiotes* test and control group

项目	凤眼莲	水浮莲	对照
水体氮总量/g	3.30±0.55a	3.31±0.59a	3.20±0.57a
水体氮损失量/g	2.45±0.48a	2.32±0.79a	1.94±0.54a
植株同化氮含量/g	2.19±0.20a	1.93±0.21a	—
沉积物氮含量/g	0.17±0.06a	0.27±0.01ab	1.62±0.49b
差值/g	0.09a	0.12a	0.36b

注: 同行不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$); 差值=水体氮损失量-植株同化氮含量-沉积物氮含量。

凤眼莲试验组及水浮莲试验组沉积物中氮含量相对较小, 平均为 0.17、0.27 g, 而对照组沉积物氮总量相对较高, 平均为 1.62 g, 表明凤眼莲和水浮莲可以有效降低水体沉积物的形成。

各试验组氮差值主要是水体的硝化、反硝化、成对硝化-反硝化反应产生 N_2O 气体造成的。

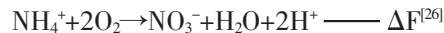
3 讨论

凤眼莲与水浮莲在本研究中水体总氮、硝态氮、铵态氮表现出相似的变化趋势, 水体总氮 30 d 去除率平均分别为 74.24% 和 70.10%。现有模拟试验中凤眼莲对水体中总氮去除率的报道主要在 84.95%~90.90% 之间^[2,17], 而水浮莲对水体中总氮去除率的报道主要在 53.26%~60.70% 之间^[18-19]。表明凤眼莲和水浮莲总氮去除率很大程度上受水体中总氮浓度^[20]、初始投苗量^[17]、氮元素形态^[2]、水力停留时间^[18]和水体温度^[19]的影响。

水体中 DO 水平取决于水体系统中其来源与去向^[21], DO 主要有以下几个来源: (1) 通过大气自然复氧进入系统的 DO; (2) 水体中浮游植物光合作用产生的 DO; (3) 通过植物根系泌氧得到的 DO。而系统中 DO 的消耗途径主要有: (1) 好氧微生物分解水体中污染物质耗氧; (2) 氨氮硝化作用耗氧; (3) 植物根系呼吸作用耗氧; (4) 浮游生物呼吸作用耗氧^[21]。现有漂浮植物对水体 DO 影响的报道多数认为凤眼莲能显著

降低水体 DO 及 pH 值^[22-24], 但也有部分报道认为种养漂浮植物可以明显增加水体 DO^[11,25]。而本研究发现, 凤眼莲、水浮莲均显著降低了水体 DO 及 pH 值(图 1、图 2)。水体 DO 及 pH 值的降低一方面威胁到水体中鱼类、浮游动物的生存, 从而破坏原有的生态系统^[26], 另一方面水体 DO 及 pH 值的降低, 也会促进了水体沉积物中氮磷的释放、藻类数量增加和水体富营养化的加剧^[27]。但是本课题组的研究发现^[28]在大水面开放性水体的试验中, 凤眼莲种养区水体 DO、pH 值虽然较近水葫芦区和远水葫芦区显著降低, 但水葫芦区溶解氧仍维持在较高水平。

水体中铵态氮(NH_4^+-N)与硝态氮(NO_3^--N)在一定情况下可以相互转化^[29], 种养漂浮水生植物可以促进富营养化水体的硝化、反硝化、成对硝化-反硝化反应过程^[30], 水体的硝化反应最先是将水体中 NH_4^+-N 转化为 NO_3^--N 。正是由于水体的硝化作用, 本研究中, 前 5 d 水体 NH_4^+-N 浓度急剧下降, 凤眼莲、水浮莲和对照前 5 d NH_4^+-N 去除率达 80.12%、87.68% 和 76.30%, 而凤眼莲前 5 d NO_3^--N 浓度升幅达 19.17%, 5 d 以后由于水生植物的吸收作用 NH_4^+-N 浓度、 NO_3^--N 浓度不断下降。水体中氨氮硝化反应如下:



漂浮水生植物能降低水体中固体悬浮物浓度、提高透明度已经被广泛证实^[31-32]。在本试验中, 凤眼莲试验组与水浮莲试验组水体总氮(TN)显著低于对照试验组($P<0.05$), 但是溶解态总氮(DTN)不同试验组之间无明显差异, 说明对照试验组水体中固体悬浮物浓度高于凤眼莲试验组和水浮莲试验组, 证明种养漂浮植物能有效降低固体悬浮物浓度。

通过凤眼莲试验组、水浮莲试验组和对照试验组氮平衡计算, 凤眼莲试验组、水浮莲试验组和对照组沉积物中氮含量占水体中氮损失量比率平均分别为 6.94%、11.64% 和 83.51%, 说明凤眼莲和水浮莲能有效抑制水体沉积物的形成。其原因可能是: (1) 种养漂浮植物能有效降低固体悬浮物浓度, 从而减少沉积物的形成; (2) 由于种养漂浮植物吸收作用, 压缩了浮游生物的活力空间, 降低了浮游生物的代谢强度, 导致浮游生物的代谢产物的减少。

4 结论

本研究采用室内模拟的方法, 分析和比较了 2 种漂浮水生植物——凤眼莲、水浮莲对滇池草海富营养化水体氮富集和去除能力, 结论如下:

(1)凤眼莲、水浮莲均能显著降低水体 DO 及 pH 值。

(2)凤眼莲、水浮莲均能有效降低固体悬浮物浓度,能有效抑制水体沉积物的形成。

(3)凤眼莲与水浮莲对水体总氮 30 d 去除率平均分别为 74.24%、70.10%。凤眼莲、水浮莲均能显著降低水体的总氮浓度。在同等条件下,凤眼莲、水浮莲富集水体氮的基本能力一致。考虑到如果大规模种养,而水浮莲植株相对凤眼莲植物叶片及根较脆,采收过程及大风浪条件下易破损,故认为大规模控制性种养凤眼莲是一种治理富营养化湖泊的可行途径。

参考文献:

- [1] 黄文成, 徐廷志. 试论沉水植物在治理滇池草海中的作用[J]. 广西植物, 1994, 14(4): 334-337.
HUANG Wen-cheng, XU Ting-zhi. On effect of using submerged plants to harness the inner Dianchi Lake[J]. *Guihaia*, 1994, 14(4): 334-337. (in Chinese)
- [2] 姚 辉, 郭荣军, 叶建平, 等. 几种漂浮水生植物的净水能力分析与筛选[J]. 宁波农业科技, 2012(3): 15-18.
YAO Hui, GUO Rong-jun, YE Jian-ping, et al. Analysis and screening of several floating aquatic plant water purification ability[J]. *Ningbo Agricultural Science and Technology*, 2012(3): 15-18. (in Chinese)
- [3] 张志勇, 刘海琴, 严少华, 等. 水葫芦去除不同富营养化水体中氮、磷能力的比较[J]. 江苏农业学报, 2009, 25(5): 1039-1046.
ZHANG Zhi-yong, LIU Hai-qin, YAN Shao-hua, et al. Comparison of the removal ability of nitrogen and phosphorous by water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in differently eutrophic water[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2009, 25(5): 1039-1046. (in Chinese)
- [4] 袁 蓉, 刘建武, 成旦红, 等. 凤眼莲对多环芳烃(萘)有机废水的净化[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2004, 10(3): 272-276.
YUAN Rong, LIU Jian-wu, CHENG Dan-hong, et al. Removal of naphthalene by *Eichhornia Crassipes* solms and study on the mechanism[J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science Edition)*, 2004, 10(3): 272-276. (in Chinese)
- [5] 夏会龙, 吴良欢, 陶勤南. 凤眼莲植物修复水溶液中甲基对硫磷的效果与机理研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(3): 329-332.
XIA Hui-long, WU Liang-huan, TAO Qin-nan. Phytoremediation of methyl parathion by water hyacinth (*Eichhornia crassipes* solms)[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22(3): 329-332. (in Chinese)
- [6] Reed S C, Middlebrook E J, Crites R W. Natural systems for waste management and treatment[M]. New York: McGrawHill, 1998.
- [7] Reddy K R, Smith W H. Aquatic plants for water treatment and resource recovery[M]. Orlando FL: Magnolia Publishing Inc, 1987: 1032.
- [8] Zimmels Y, Kirzhner F, Mxlkovskjx A. Application of *Eichhornia crassipes* and *Pistia stratiotes* for treatment of urban sewage in Israel[J]. *Journal of Environmental Management*, 2006, 81: 420-428.
- [9] Amanda M Nahlik, William J Mitsch. Tropical treatment wetlands dominated by free-floating macrophytes for water quality improvement in Costa Rica[J]. *Ecological Engineering*, 2006, 28: 246-257.
- [10] Reeta D Sooknkh, Ann C Wilkie. Nutrient removal by floating aquatic macrophytes cultured in anaerobically digested flushed dairy manure wastewater[J]. *Ecological Engineering*, 2004, 22: 27-42.
- [11] 娄 敏, 廖伯寒, 刘红玉, 等. 3 种水生漂浮植物处理富营养化水体的研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(3): 194-195.
LOU Min, LIAO Bo-han, LIU Hong-yu, et al. Study of three aquatic floating plants to treat the water eutrophication[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, 13(3): 194-195. (in Chinese)
- [12] 吾甫尔·米吉提, 艾尔肯·热合曼, 苏里坦·阿巴拜克力, 等. 利用水浮莲(*Pistia stratiotes* L.)净化城市污水的实践[J]. 中国环境科学, 2002(3): 77-80.
Gofur Mijit, Erkin Rahman, Sultan Ababakry, et al. Practice of purifying city wastewater by water lettuce (*Pistia stratiotes* L.)[J]. *China Environmental Science*, 2002(3): 77-80. (in Chinese)
- [13] 艾尔肯·热合曼, 阿布都克力木·热合曼, 吾甫尔·米吉提, 等. 利用水浮莲净化麻黄素厂污水的中试研究[J]. 中国环境科学, 2000(5): 25-29.
Erkin Rahman, Abdurkerim Rahman, Gofur Mijit, et al. Study on purification of ephedrine factory's sewage by water lettuce (*Pistia stratiotes* L.) in medium scale experiment[J]. *China Environmental Science*, 2000(5): 25-29. (in Chinese)
- [14] 夏 倩, 刘 凌, 王流通, 等. 连续流动分析仪在水质分析中的应用[J]. 分析仪器, 2012(2): 64-68.
XIA Qian, LIU Ling, WANG Liu-tong, et al. Application of continuous flow analyzer in water analysis[J]. *Analytical Instrumentation*, 2012(2): 64-68. (in Chinese)
- [15] 沈建红, 闫国利, 曹雪英. AA3 流动注射仪同时测定水中氨氮和氰化物[J]. 预防医学论坛, 2012, 18(6): 441-442, 445.
SHEN Jian-hong, YAN Guo-li, CAO Xue-ying. Simultaneous determination of ammonia nitrogen and cyanide in water with AA3 flow injection analyzer[J]. *Preventive Medicine Tribune*, 2012, 18(6): 441-442, 445. (in Chinese)
- [16] 景丽洁, 袁东海, 王晓栋, 等. 水生植物总氮测定中两种消化方法的比较[J]. 环境污染与防治, 2005(5): 392-394.
JING Li-jie, YUAN Dong-hai, WANG Xiao-dong, et al. Comparison of two methods for determination of total nitrogen in aqua-plants[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2005(5): 392-394. (in Chinese)
- [17] 张志勇, 常志州, 刘海琴, 等. 不同水力负荷下凤眼莲去除氮、磷效果比较[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(2): 148-154.
ZHANG Zhi-yong, CHANG Zhi-zhou, LIU Hai-qin, et al. Effect of *Eichhornia crassipes* on removing nitrogen and phosphorus from eutrophic water as affected by hydraulic loading[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(2): 148-154. (in Chinese)
- [18] 邵林广. 水浮莲净化富营养化湖泊试验研究[J]. 环境与开发, 2001(2): 28-29.
SHAO Lin-guang. Experiment research in purification on nutrient lakes by means of *Pistia stratiotes*[J]. *Environment and Exploitation*, 2001(2): 28-29. (in Chinese)
- [19] 李 猛, 马旭洲, 王 武. 大藻对水体氮磷去除效果的初步研究[J].

- 长江流域资源与环境, 2012(9): 1137-1142.
- LI Meng, MA Xu-zhou, WANG Wu. Effects of *Pistia stratiotes* L on removal rate for nitrogen and phosphorus in polluted water body[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012(9): 1137-1142. (in Chinese)
- [20] 严国安, 任 南, 李益健. 环境因素对凤眼莲生长及净化作用的影响[J]. 环境科学与技术, 1994(1): 2-5, 27.
YAN Guo-an, REN Nan, LI Yi-jian. Effects of environmental factors on the growth and purification effect of *Eichhornia crassipes*[J]. *Environmental Science and Technology*, 1994(1): 2-5, 27. (in Chinese)
- [21] 唐 丹, 罗固源, 冉青松. 生态浮床系统溶解氧的平衡方程[J]. 三峡环境与生态, 2011(1): 10-13, 17.
TANG Dan, LUO Gu-yuan, RAN Qing-song. The equilibrium equation of dissolved oxygen in the biological floating bed system[J]. *Environment and Ecology in the Three Gorges*, 2011(1): 10-13, 17. (in Chinese)
- [22] Giraldo E, Garzon A. The potential for water hyacinth to improve the quality of Bogota River water in the Muña Reservoir: Comparison with the performance of waste stabilization ponds[J]. *Water Science and Technology*, 2002, 42: 103-110.
- [23] Rommens W, Maes J, Dekeza N, et al. The impact of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in a eutrophic subtropical impoundment (Lake Chivero, Zimbabwe) Water quality[J]. *Archiv fur Hydrobiologie*, 2003, 158: 373-388.
- [24] 蔡雷鸣. 福建闽江水口库区漂浮植物覆盖对水体环境的影响[J]. 湖泊科学, 2006, 18: 250-254.
CAI Lei-ming. Impact of floating vegetation in Shuikou impoundment, Minjiang River, Fujian Province[J]. *Journal of Lake Science*, 2006, 18: 250-254. (in Chinese)
- [25] 吴振斌, 夏宜铮. 凤眼莲净化燕山石油化工废水的研究 II: 静态净化试验[J]. 水生生物学报, 1987, 11(4): 299-309.
WU Zhen-bin, XIA Yi-zheng. Study of *Eichhornia crassipes* purification Yanshan petrochemical wastewater II: Static purification test[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1987, 11(4): 299-309. (in Chinese)
- [26] 赵海超, 王圣瑞, 赵 明, 等. 洱海水体溶解氧及其与环境因子的关系[J]. 环境科学, 2011(7): 1952-1959.
ZHAO Hai-chao, WANG Sheng-rui, ZHAO Ming, et al. Relationship between the DO and the environmental factors of the water body in Lake Erhai[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2011(7): 1952-1959. (in Chinese)
- [27] 韦柳枝. 低溶解氧对中国明对虾生长的影响及其机制的实验研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
WEI Liu-zhi. Effects of low dissolved oxygen on the growth of Chinese shrimp, *Fenneropenaeus chinensis* and the mechanism[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010. (in Chinese)
- [28] 王 智, 张志勇, 韩亚平, 等. 滇池湖湾大水域种养水葫芦对水质的影响分析[J]. 环境工程学报, 2012, 11: 3827-3832.
WANG Zhi, ZHANG Zhi-yong, HAN Ya-ping, et al. Effects of large-area planting water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) on water quality in the bay of Lake Dianchi[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 11: 3827-3832. (in Chinese)
- [29] 张自杰, 顾夏生. 排水工程(第三版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 305-347.
ZHANG Zi-jie, GU Xia-sheng. Wastewater engineering(3rd Edition) [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2000: 305-347. (in Chinese)
- [30] 高 岩, 易 能, 张志勇, 等. 凤眼莲对富营养化水体硝化、反硝化脱氮释放 N_2O 的影响[J]. 环境科学学报, 2012(2): 349-359.
GAO Yan, YI Neng, ZHANG Zhi-yong, et al. Effect of water hyacinth on N_2O emission through nitrification and denitrification reactions in eutrophic water[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012(2): 349-359. (in Chinese)
- [31] 李荫玺, 李文朝, 杨逢乐, 等. 星云湖隔河湖湾漂浮植物除藻技术研究[J]. 云南环境科学, 2006(3): 42-44.
LI Yin-xi, LI Wen-chao, YANG Feng-le, et al. Research on technology of removing the algae by floating vegetation in Gehe River bay of Xingyun Lake[J]. *Yunnan Environmental Science*, 2006(3): 42-44. (in Chinese)
- [32] 吴 湘, 杨肖娥, 李廷强, 等. 漂浮植物对富营养化景观水体的净化效果研究[J]. 水土保持学报, 2007(5): 128-132.
WU Xiang, YANG Xiao-e, LI Ting-qiang, et al. Study on purified efficiency of phosphorus and nitrogen from eutrophicated sight water by several floating macrophytes[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007(5): 128-132. (in Chinese)