

水葫芦对滇池底泥氮磷营养盐释放的影响

王智^{1,2} 王岩¹ 张志勇¹ 张君倩¹ 严少华^{1*} 张迎颖¹ 刘海琴¹

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014; 2. 中国科学院测量与地球物理研究所环境与灾害监测评估湖北省重点实验室, 武汉 430077)

摘要 为了探讨水葫芦对富营养湖泊底泥氮磷营养盐释放的影响, 通过原位采集滇池柱状底泥, 以蒸馏水为上覆水, 进行了25 d的室内静态模拟实验。实验比较了水葫芦处理组和空白对照组底泥氨氮(NH_4^+-N)、硝态氮(NO_3^--N)、溶解性总氮(DTN)、正磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$)等的释放特征。结果表明, 与对照组相比, 水葫芦处理组上覆水溶解氧、pH显著性降低, 而 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度显著性升高; 在实验前2 d, 水葫芦处理组上覆水 NH_4^+-N 和DTN浓度显著性高于对照组, 而在5~25 d时, 其显著性低于对照组。根据上覆水营养盐浓度、水葫芦植株吸收营养盐总量, 推算底泥氮磷营养盐释放的平均速率, 表明水葫芦加速了滇池底泥氮、磷营养盐的释放速率, 处理组氮、磷释放速率分别为对照组的5.3~170.2和1.5~21.6倍。

关键词 水葫芦 营养盐 沉积物 释放 滇池

中图分类号 X524 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2012)12-4339-06

Effects of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) on release of nitrogen and phosphorus from sediment of Lake Dianchi

Wang Zhi^{1,2} Wang Yan¹ Zhang Zhiyong¹ Zhang Junqian¹ Yan Shaohua¹ Zhang Yingying¹ Liu Haiqin¹

(1. Institute of Agricultural Resource and Environmental Sciences, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. Key Laboratory for Environment and Disaster Monitoring and Evaluation of Hubei, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China)

Abstract To evaluate the effects of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) on release of nitrogen and phosphorus from sediment, a 25-day laboratory experiment was carried out. The sediment was taken from Lake Dianchi and was covered by water with water hyacinth as treatments and by water only as controls. Released nutrients such as ammonia, nitrate and dissolved total nitrogen, orthophosphate from the sediment were compared between treatments and controls. Results showed that dissolved oxygen and pH significantly decreased and orthophosphate significantly increased in treatments compared to controls ($P < 0.05$). During the first two days of the experiment, ammonia and dissolved total nitrogen in treatments were significantly ($P < 0.05$) higher than in controls. However, from the fifth day forward, the results were inversed. The average release rates of nitrogen and phosphorus were calculated based on the concentrations of nitrogen and phosphorus in overlying water and total contents of nitrogen and phosphorus absorbed by water hyacinth. The results showed that water hyacinth accelerated the release rates of nitrogen and phosphorus from the sediment. The release rates of nitrogen and phosphorus released were 5.3~170.2 and 1.5~21.6 times higher in treatments than in controls respectively.

Key words water hyacinth; nutrients; sediment; release; Lake Dianchi

底泥作为湖泊的重要组成部分, 对湖泊水环境质量具有重要影响, 在一定条件下, 累积于底泥中的营养物质通过与上覆水体间的物理、化学、生物交换作用, 重新释放进入水体^[1]。底泥营养盐释放是影响湖泊浮游植物生长和富营养化的关键过程之一^[2,3]。因此, 研究湖泊底泥的氮磷释放规律及影响因素对于湖泊富营养化控制具有重要的意义。

水葫芦, 学名“凤眼莲 (*Eichhornia crassipes*)”, 雨久花科凤眼莲属, 为多年生漂浮性草本植物, 起源

于南美。水葫芦一方面由于生长速度快并且缺乏天敌, 常在我国湖泊、水库以及河道中大量生长^[4,5]。

基金项目: “十二五”滇池水专项(2012ZX07102-004-6); 国家科技支撑计划项目(2009BAC63B01); 云南省社会发展专项(2009CA034); 江苏省人社厅博士后基金(5311105)

收稿日期: 2011-07-05; **修订日期:** 2011-09-11

作者简介: 王智(1983~), 男, 博士, 助研, 主要从事湖泊富营养化治理方面的研究。E-mail: wazh519@hotmail.com

* 通讯联系人, E-mail: shyan@jaas.ac.cn

另一方面,由于具有极强的氮、磷吸收能力以及重金属富集能力而被广泛用于水环境污染的治理^[6,7]。水葫芦在水体表面覆盖生长,能对水体的溶解氧、pH、水生生物以及微生物产生一定影响^[8]。研究表明,溶解氧、温度、pH、风浪扰动等非生物因素以及浮游生物、底栖动物和微生物等生物因素均能影响水体底泥营养盐的释放^[1,9,10]。因此,水葫芦在水体的生长,势必会对水体底泥营养盐内源释放造成影响。

滇池是我国最为著名的高原淡水湖,海拔1 884.4 m,面积约300 km²,平均水深4.2 m^[11]。自20世纪80年代以来,滇池入湖污染物不断增加,水体水质日趋恶劣,富营养化及蓝藻水华日益严重,成为我国重点治理的“三湖三河”之一。2010年,江苏省农业科学院利用水葫芦快速吸收水体氮磷的优势,联合昆明市滇池生态研究所于滇池白山湾开展了水葫芦富集氮磷与资源化利用研究与示范项目,大水域控制性种养水葫芦约0.7 km²;2011年,昆明市委、市政府在2010年的技术基础上,逐步在滇池草海及外海控制性种养水葫芦预计达22 km²,通过对水葫芦的“控制性种养—机械化采收—资源化利用”来达到清除滇池内源污染,净化滇池水质的目的。水葫芦在滇池如此大规模的种养,在研究其对水体水质的影响同时,更有必要探讨水葫芦对底泥营养盐释放的影响规律。

先前,一些学者主要探讨了水葫芦对水质的改善作用^[12,13],很少注意到水葫芦对水体底泥营养盐释放的影响。本文主要通过对滇池白山湾采集柱状泥样人工模拟的方法,比较有无水葫芦存在条件下,滇池底泥氮磷营养盐的释放规律。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2010年10月,在滇池白山湾水葫芦生长区域外同一样点,利用有机玻璃柱状采样器(内径为85 mm,高700 mm)采集未扰动泥样,泥样深度约为25 cm,柱样上端保留原上覆水样,上下两端用橡皮塞塞紧后垂直放置,小心带回实验室。共采集柱状泥样6根。同时在滇池周边水沟中采集生长健康的水葫芦(株高:8~10 cm,根长:8~10 cm),洗净,带回实验室备用。

1.2 实验方法

泥柱运回实验室后,立即用虹吸的方法小心抽出上覆水,再以虹吸的方法缓慢加入蒸馏水作为上

覆水,保持水位高度一致,在管外标记液面高度。所有操作尽量不扰动底泥界面。每个实验样管中底泥高度约25 cm,上覆水高度约45 cm。实验样管共分为两组,一组未添加水葫芦作为对照组(底泥+蒸馏水),一组为添加水葫芦作为处理组(底泥+蒸馏水+水葫芦),每组3个平行。实验中,水葫芦的初始放养量为60 g鲜重(覆盖度约100%)。为了更好的结合滇池实际,所有实验样管放置于滇池边一个能透射阳光的人工防雨棚中,实验周期内,气温:12.6~20.8℃,水温:14.2~19.3℃。实验中,由于水分的蒸发(对照组每样管日蒸发量约为30 mL,处理组约为60 mL),每天上午10时和下午4时补充蒸馏水至刻度处。

实验共培养25 d,在第2、5、10、15、20和25天下午2时通过虹吸在泥-水界面上2 cm处取样50 mL测定水体pH、溶解氧(DO)、正磷酸盐(PO_4^{3-})、氨氮(NH_4^+-N)、硝氮(NO_3^--N)和溶解性总氮(DTN),取样后补充蒸馏水至管外刻度处。

此外,在实验初始测定水葫芦总氮、总磷含量,在实验结束时(第25天),测定水葫芦鲜重、干重及总氮、总磷含量。

1.3 分析方法

DO、pH采用便携式DO仪及便携式pH计测定。将水样过0.45 μm滤膜后测定 PO_4^{3-} 、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 和DTN,测定方法参见文献[14]。水葫芦株体中总氮、总磷采用浓 $\text{H}_2\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}_2$ 消解法测定,测定方法详见文献[15]。

1.4 数据处理

所有数据均由均值±标准差表示。统计处理采用统计软件SPSS 16.0。处理组与对照组的差异比较采用 t 检验,显著性水平设置为 $p < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 上覆水DO和pH的变化

在实验周期内,对照组上覆水DO为4.5~7.5 mg/L(均值为6.2 mg/L),水葫芦处理组DO为2.7~6.3 mg/L(均值为4.0 mg/L)(图1a)。统计分析表明,水葫芦处理组分DO显著性低于对照组($t = 4.09, p < 0.01$)。在实验周期内,对照组pH在8.30~8.96范围波动,而水葫芦处理组,pH随着培养时间的增加而表现出一种逐步降低的趋势(图1b)。统计分析显示,水葫芦处理组pH显著性低于对照组($t = 6.66, p < 0.001$)。水葫芦降低水体的DO及

pH 已被证实^[16,17],因本实验中水葫芦根系未发生死亡,故水体 DO 及 pH 的降低不是由于水葫芦根系的腐败分解消耗水体 DO 而产生 CO₂,而是由于水葫芦的覆盖而阻断了大气向水体复氧以及水葫芦根系的呼吸作用吸收水体 DO 而产生 CO₂ 的缘故。

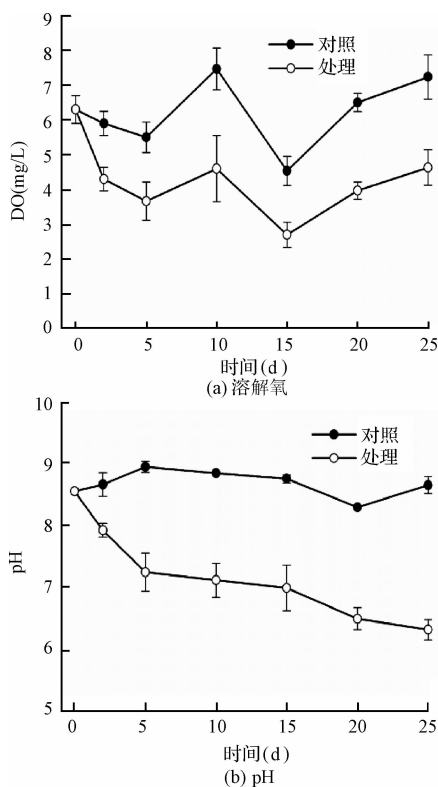


图 1 对照组与处理组上覆水溶解氧和 pH 的变化

Fig. 1 Changes of dissolved oxygen and pH in overlying water of controls and treatments

2.2 上覆水氮浓度的变化

实验中,处理组和对照组 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 DTN 含量变化如图 2 所示。对照组上覆水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量在实验开始的前 5 d 内逐步上升,之后出现一个波动下降的趋势(图 2a);处理组中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在第 2 天达到最大值,之后逐步下降,到第 10 天后,上覆水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 基本稳定在 0.03 mg/L 的水平(图 2a)。统计分析显示,在第 2 天时,处理组 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量显著性大于对照组 ($t = 3.70, p < 0.05$),从第 5 天后(除第 20 天外),水葫芦处理组分 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量显著小于对照组 ($t = 2.17, p < 0.05$)。

在实验的前 5 d 内,处理组 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度略高于对照组,后有所下降,表现为在第 5 ~ 10 天,处理组 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度略低于对照组(图 2b)。对整个实验周期内的统计分析表明,水葫芦处理组与对照组间

$\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量不存在差异 ($t = 0.332, p = 0.745$)。

对照组 DTN 在实验的前 5 d 呈现出一种逐步上升的趋势,之后趋于稳定;而处理组 DTN 浓度在第 2 天后基本趋于稳定(图 2c)。统计分析表明,在第 2 天时,处理组上覆水 DTN 含量显著性高于对照组 ($t = 4.04, p < 0.05$);而从第 5 天起,处理组 DTN 含量显著性低于对照组 ($t = 6.08, p < 0.001$)。

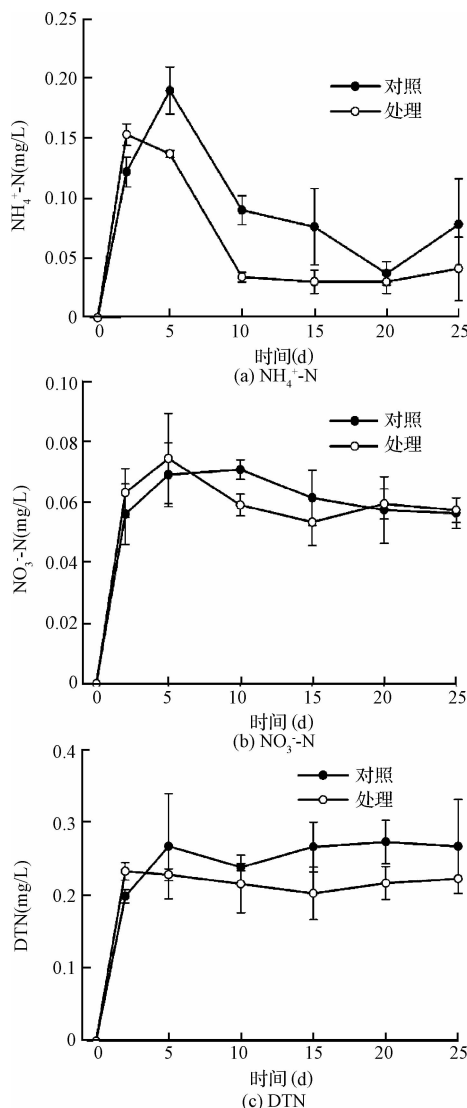


图 2 对照组与处理组上覆水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 DTN 的变化

Fig. 2 Changes of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and DTN in overlying water of controls and treatments

2.3 上覆水磷酸盐浓度的变化

水葫芦处理组和对照组上覆水中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度均表现为一种先迅速上升后缓慢下降,最后趋于稳定的趋势(图 3)。整个实验周期中,处理组 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度范围为 0.056 ~ 0.091 mg/L,而对照组为 0.046 ~

0.068 mg/L(图3)。统计分析显示,处理组上覆水中磷酸盐浓度显著高于对照组($t = 3.24, p < 0.01$),表明水葫芦的存在加速了滇池底泥 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的释放。

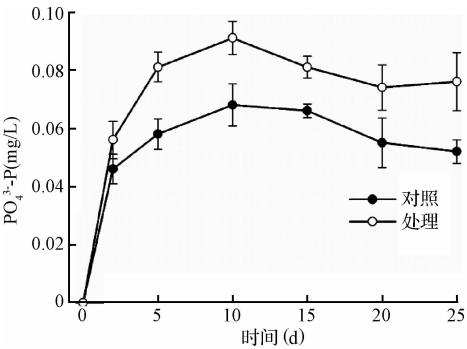


图3 对照组与处理组上覆水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的变化
Fig.3 Changes of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ in overlying water of controls and treatments

2.4 水葫芦植株氮磷吸收量

处理组水葫芦生长状况良好,处理组水葫芦干重、鲜重及体内总氮、总磷含量水平如表1所示。初始放养的水葫芦鲜重与干重分别为 $(60 \pm 1.00)\text{ g}$ 和 $(3.87 \pm 0.39)\text{ g}$,实验结束时分别为 $(68 \pm 3.60)\text{ g}$ 和 $(4.51 \pm 0.57)\text{ g}$,增加量分别为 13.3% 和 16.5%。根据水葫芦体内氮磷含量百分比,可以计算出水葫芦在实验前后体内总氮磷含量。假设水葫芦生长体内氮磷含量的增加量均为水葫芦从水体中吸收而来,那么从表1数据可以计算出,在处理组,水葫芦生长吸收了水体中溶解态氮为 26.3 mg,磷为 0.49 mg。底泥氮磷释放总量由上覆水氮磷量,取样带走的氮磷量以及水葫芦吸收的氮磷量组成。通过实验组分中上覆水 DTN 及 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度,取样体积及水葫芦生长吸收的氮磷量,进一步计算表明,水葫芦吸收氮的量占底泥氮释放总量的 97%,磷占底泥磷释放总量的 69%。

表1 处理组中水葫芦的生长状况及体内氮磷含量
Table 1 Growth and nitrogen and phosphorus content of water hyacinth in treatments

		鲜重 (g)	干重 (g)	含量百分比 (%)	含量 (mg)
N	初始	60.0 ± 1.00	3.87 ± 0.39	4.10 ± 0.16	158.8 ± 7.9
	结束	68.0 ± 3.60	4.51 ± 0.57	4.07 ± 0.35	185.1 ± 16.2
P	初始	60.0 ± 1.00	3.87 ± 0.39	0.152 ± 0.023	5.87 ± 0.69
	结束	68.0 ± 3.60	4.51 ± 0.57	0.142 ± 0.020	6.36 ± 0.58

2.5 氮磷的平均释放速率

水体中氮存在 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 等多种

形态,水葫芦生长吸收以及底泥释放的氮均为可溶性氮,因此,以溶解性总氮(DTN)为指标计算氮的释放速率。通过各组相邻两次取样后上覆水中DTN及 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度差异、实验样管底面积($S = 56.75\text{ cm}^2$)、水葫芦吸收的水体的氮磷量以及采样时间间隔,可以计算出该期间底泥氮磷释放平均速率($\mu\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$)。在实验初期(第2天),各实验组份氮磷释放速率均达最大值,之后逐步下降并趋于稳定(图4)。统计分析表明,水葫芦处理组底泥氮释放速率显著性高于对照组($t = 16.38, p < 0.001$),释放速率为对照组的 5.3 ~ 170.2 倍;磷的释放速率也显著性高于对照组($t = 5.34, p < 0.01$),处理组 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 释放速率为对照组的 1.5 ~ 21.6 倍。

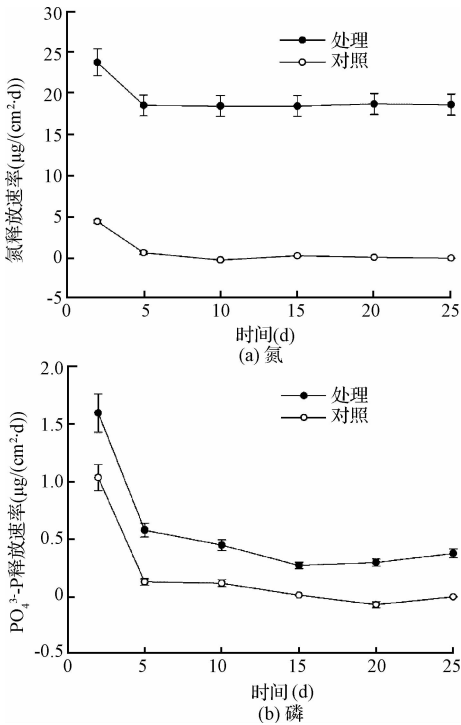


图4 对照组与处理组底泥氮、磷释放速率
Fig.4 Rates of release of nitrogen and phosphorus from sediments in controls and treatments

3 讨论

本实验中,对照组上覆水营养盐浓度主要受底泥营养盐释放的影响,而处理组同时受底泥营养盐释放以及水葫芦吸收两个方面的影响。本研究发现,在实验初始阶段,处理组上覆水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 以及 DTN 浓度均高于对照组,这可能是由于水葫芦作用,底泥营养盐释放大于水葫芦吸收的缘故;实验

后期,由于水葫芦适应环境,生长加快,水体营养盐吸收速度也加快,因此,在实验后期,水葫芦处理组上覆水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 DTN 浓度低于对照组(图 2)。上覆水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的变化规律存在差异,主要原因是水葫芦对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的吸收能力大于对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 吸收能力^[16]。

先前,仅童昌华等^[18]研究了水葫芦对湖泊底泥营养盐释放的影响,其研究表明,水葫芦能有效抑制湖泊底泥中 TN、TP、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的释放。本实验首次证实了水葫芦能显著的增大滇池底泥氮磷营养盐的释放速率(图 4),与童昌华等^[18]的研究存在一定的差异,这主要是由于童昌华等^[18]的研究仅关注了上覆水体营养盐浓度的变化,而忽略了水葫芦对水体营养盐的吸收。事实上,水葫芦对水体营养盐的吸收量占底泥营养盐释放的比例很大,如本实验中水葫芦吸收氮的量占底泥氮释放总量的 97%,磷占底泥磷释放总量的 69%。本实验中,水葫芦能显著促进滇池底泥营养盐的释放,其原因分析如下:(1) 水葫芦降低了水体的 DO。已有大量的研究表明,水体 DO 的降低有利于底泥营养盐的释放^[1,19,20]; (2) 化学物质在底泥-上覆水界面的吸附与释放过程主要是由浓度差支配^[21]。当上覆水氮磷营养物浓度降低时,则底泥向上覆水的释放加大。本实验中,由于水葫芦的对水体氮磷等物质的吸收使上覆水氮磷浓度降低,而在浓度差的支配作用下,水葫芦处理组氮磷释放量增加。先前,我国学者蒋小欣等^[22]的研究也表明,上覆水体的营养盐水平可对底泥中营养盐的释放程度(即释放速率和释放量)产生影响,氮营养盐含量低的上覆水体有利于底泥中氮特别是氨氮的释放。在本研究中,仅利用蒸馏水为上覆水探讨了水葫芦对滇池底泥氮磷营养盐释放的影响,在今后的研究中,我们将以湖泊水体为上覆水,原位探讨水葫芦对湖泊不同底泥氮磷释放的影响规律。

水葫芦生长能促进水体底泥氮磷等营养盐释放,会对水体富营养化带来不利影响。例如在一些自然水体中,水葫芦常常缺乏管理而泛滥,其一方面加大了水体底泥营养盐的释放,另一方面水葫芦的分解腐败也将对水体造成二次污染,因此,缺乏管理的水葫芦将加大水体富营养化的风险。然而,在富营养化湖泊中,水葫芦促进释放的氮磷营养盐,主要为底泥中不稳定态氮磷营养盐,在一定条件下(如风浪扰动,DO 降低等),这部分物质随时可能释放

进入水体,对水体造成二次污染。因此,作为生态工程应用的水葫芦,在及时采收水葫芦的情况下,能有效去除底泥中不稳定态营养盐,防止底泥释放的二次污染,这对于清除湖泊内源污染具有重要意义。本研究发现水葫芦加速底泥氮磷营养盐的释放,造成水体营养盐尤其是磷浓度的增加,其主要原因之一是水葫芦降低了上覆水 DO。因此,在水葫芦的生态工程中,必须谨慎科学地利用水葫芦,分区块间隔地种养水葫芦,控制其覆盖度,防止 DO 的过度降低。当然具体的生态工程实施还有待进一步的原位调查研究。

4 结 论

(1) 在实验前 2 d,水葫芦处理组上覆水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 DTN 显著性高于对照组,而在第 5 天后, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 DTN 显著性低于对照组。在整个实验周期内,水葫芦处理组分 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 均显著高于对照组。

(2) 水葫芦增大滇池底泥氮磷营养盐释放,处理组氮、磷释放速率分别为对照组的 5.3 ~ 170.2 倍和 1.5 ~ 21.6 倍。其主要原因一是水葫芦降低了上覆水 DO,二是水葫芦的吸收降低了上覆水的氮磷浓度,从而扩大了底泥-上覆水界面氮磷营养盐浓度差。

参 考 文 献

- [1] 朱健,李捍东,王平. 环境因子对底泥释放 COD、TN 和 TP 的影响研究. 水处理技术, **2009**,35(8):44-49
Zhu Jian, Li Handong, Wang Ping. The impact of environmental factors on COD, TN, TP release from sediment. Technology for Water Treatment, **2009**,35(8):44-49(in Chinese)
- [2] Hubble D. S., Harper D. M. Nutrient control of phytoplankton production in Lake Naivasha, Kenya. Hydrobiologia, **2002**,488(1-3):99-105
- [3] Kisand A., Nöges P. Sediment phosphorus release in phytoplankton dominated versus macrophyte dominated shallow lakes: Importance of oxygen conditions. Hydrobiologia, **2003**,506/509(1-3):129-133
- [4] 万咸涛. 汉江水葫芦大面积水域出现对水环境影响分析. 城市环境, **2002**,16(2):27-30
Wan Xiantao. Analysis of the environment impact of water with bulk domain of *Eichhornia Crassipes* in Hanjiang River. City Environment, **2002**,16(2):27-30(in Chinese)
- [5] 丁建清,王韧,范中南,等. 恶性水生杂草水葫芦在我国的发生危害及其防治. 杂草学报, **1995**,9(2):49-51

- Ding Jianqing, Wang Ren, Fan Zhongnan, et al. The occurrence, damage and control of vicious aquatic weed water hyacinth in China. *Journal of Weed*, **1995**, 9(2):49-51 (in Chinese)
- [6] Malik A. Environmental challenge vis a vis opportunity: The case of water hyacinth. *Environment International*, **2007**, 33(1):122-138
- [7] 常志州, 郑建初. 水葫芦放养的生态风险及控制对策. *江苏农业科学*, **2008**, (3):251-253
Chang Zhizhou, Zheng Jianchu. Evaluation on environmental risk of hyacinth (*Eichhornia crassipes*) planting and its control strategy. *Jiangsu Agricultural Sciences*, **2008**, (3):251-253 (in Chinese)
- [8] 蔡雷鸣. 福建闽江水口库区飘浮植物覆盖对水体环境的影响. *湖泊科学*, **2006**, 18(3):250-254
Cai Leiming. Impact of floating vegetation in Shuikou Impoundment, Minjiang River, Fujian Province. *Journal of Lake Sciences*, **2006**, 18(3):250-254 (in Chinese)
- [9] Zhu G. W., Qin B. Q., Gao G. Direct evidence of phosphorus outbreak release from sediment to overlying water in a large shallow lake caused by strong wind wave disturbance. *Chinese Science Bulletin*, **2005**, 50(6):577-582
- [10] 刘冬梅, 姜霞, 金相灿, 等. 太湖藻对水-沉积物界面磷交换过程的影响. *环境科学研究*, **2006**, 19(4):8-13
Liu Dongmei, Jiang Xia, Jin Xiangcan, et al. Effects of algae on the phosphorus exchange at water-sediment interface in Taihu Lake. *Research of Environmental Sciences*, **2006**, 19(4):8-13 (in Chinese)
- [11] Wang Z., Xiao B. D., Wu X. Q., et al. Linear alkylbenzene sulfonate (LAS) in water of Lake Dianchi-spatial and seasonal variation, and kinetics of biodegradation. *Environmental Monitor and Assessment*, **2010**, 171(1-4):501-512
- [12] Jayaweera M., Kasturiarachchi J. Removal of nitrogen and phosphorus from industrial wastewaters by phytoremediation using water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms). *Water Science and Technology*, **2004**, 50(6):217-225
- [13] 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. *江苏农业学报*, **2009**, 25(5):1039-1046
Zhang Zhiyong, Liu Haiqing, Yan Shaohua, et al. Comparison of the removal ability of nitrogen and phosphorous by water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in differently eutrophic water. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, **2009**, 25(5):1039-1046 (in Chinese)
- [14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 (第4版). 北京: 中国环境科学出版社, **2002**
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, **2000**
- [16] Rommens W., Maes J., Dekeza N., et al. The impact of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in a eutrophic subtropical impoundment (Lake Chivero, Zimbabwe). I. Water quality. *Archiv für Hydrobiologie*, **2003**, 158(3):373-388
- [17] 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. *环境工程学报*, **2012**, 6(11):3827-3832
Wang Zhi, Zhang Zhiyong, Han Yaping, et al. Effects of large-area planting water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) on water quality in the bay of Lake Dianchi. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2012**, 6(11):3827-3832 (in Chinese)
- [18] 童昌华, 杨肖娥, 濮培民. 水生植物控制湖泊底泥营养盐释放的效果与机理. *农业环境科学学报*, **2003**, 22(6):673-676
Tong Changhua, Yang Xiaoe, Pu Peimin. Effects and mechanism of hydrophytes on control of release of nutrient salts in lake sediment. *Journal of Agro-Environment Science*, **2003**, 22(6):673-676 (in Chinese)
- [19] 贺冉冉, 罗激葱, 朱广伟, 等. 天目湖溶解氧变化特征及对内源氮释放的影响. *生态与农村环境学报*, **2010**, 26(4):344-349
He Ranran, Luo Liancong, Zhu Guangwei, et al. Variation of dissolved oxygen and its influence on release of endogenous nitrogen in Tianmuhu Reservoir in Liyang, China. *Journal of Ecology and Rural Environment*, **2010**, 26(4):344-349 (in Chinese)
- [20] Moore P., Reddy K., Fisher M. Phosphorus flux between sediment and overlying water in Lake Okeechobee, Florida: Spatial and temporal variations. *Journal of Environmental Quality*, **1998**, 27(6):1428-1429
- [21] Lerman A. Migrational Processes and Chemical Reactions in Interstitial Water. In: Goldberg, et al. *The Sea*. New York: Wiley Interseience, **1997**
- [22] 蒋小欣, 阮晓红, 邢雅囡, 等. 城市重污染河道上覆水氮营养盐浓度及 DO 水平对底质氮释放的影响. *环境科学*, **2007**, 28(1):87-91
Jiang Xiaoxin, Ruan Xiaohong, Xing Yanan, et al. Effects of nutrient concentration and DO status of heavily polluted urban stream water on nitrogen release from sediment. *Environmental Science*, **2007**, 28(1):87-91 (in Chinese)