

# 不同 pH 值下底泥-水体-凤眼莲系统磷释放与迁移规律研究

王 岩, 张迎颖\*, 张志勇, 刘海琴, 秦红杰, 闻学政, 严少华

(江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014)

**摘要:**实验以凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)-水体-底泥系统为研究对象,探讨了 pH 值为 6.0、7.5、9.0 和 10.5 条件下,各系统内各组分(凤眼莲、水体、底泥)中总磷(TP)含量变化和释放的规律。实验结果表明:底泥 TP 的释放受 pH 值影响很大,即碱性条件下释放量最大,近中性的释放量最小;随 pH 值由低到高,种养凤眼莲各处理底泥 TP 的释放量较空白对照分别增加了 7.40、6.73、7.33 mg·kg<sup>-1</sup> 和 1.13 mg·kg<sup>-1</sup>。水体 TP 变化是底泥释放和凤眼莲吸收作用平衡后的外观表现,并不单独决定于某一因素,如 pH 值在 6.0~9.0 范围内,种养凤眼莲处理水质净化优于空白对照,其降低范围在 0.03~0.27 mg·L<sup>-1</sup> 之间;pH 值为 10.5 时,种养凤眼莲处理水质净化劣于空白对照。在凤眼莲正常生长的前提下,其吸收吸附是系统可移动 TP 的主要去向,占系统可移动磷的 73.12%~79.06%,但极端碱性条件下,凤眼莲死亡后腐烂产生的 TP 也是系统可移动 TP 的来源之一。

**关键词:**凤眼莲;pH 值;内源磷;释放规律;迁移规律

中图分类号:X524 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2015)01-0066-08 doi: 10.13254/j.jare.2014.0295

## Release and Migration of Phosphorus in a Sediment-Water-*Eichhornia Crassipes* System Under Different pH Value

WANG Yan, ZHANG Ying-ying\*, ZHANG Zhi-yong, LIU Hai-qin, QIN Hong-jie, WEN Xue-zheng, YAN Shao-hua  
(Institute of Agricultural Resource and Environmental Sciences, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** This work was conducted to study the release and migration of total phosphorus (TP) in a sediment-water-*Eichhornia crassipes* system with pH at 6.0, 7.5, 9.0 and 10.5. The variation of TP concentrations and the characteristics of TP migration were analyzed in each of the system elements, i.e., the *Eichhornia crassipes* plants, the water, and the sediment. Results showed that TP release in the sediment was greatly affected by pH. The maximum and minimum amounts of release were observed under alkaline and approximately neutral condition, respectively. TP release content were 7.40, 6.73, 7.33 mg·kg<sup>-1</sup> and 1.13 mg·kg<sup>-1</sup> higher in the sediment of sediment-water-*Eichhornia crassipes* system than in the sediment without *Eichhornia crassipes* (the control), with pH at 6.0, 7.5, 9.0 and 10.5, respectively. The observed TP concentration in the water was influenced by both the release from the sediment and the assimilation by the plants. When the pH ranged between 6.0 and 9.0, water quality purification was more effective in treatments with *Eichhornia crassipes* than in the control, where TP content was reduced by 0.03~0.27 mg·L<sup>-1</sup>. When pH reached 10.5, however, opposite results were obtained. TP was reduced mainly by assimilation and adsorption by *Eichhornia crassipes* in the system, which accounted for 73.12%~79.06% of the removable phosphorus, when the plants were under normal growth conditions. However, when *Eichhornia crassipes* died in extremely alkaline conditions, the rotten plants became one of the sources for removable phosphorus in the system.

**Keywords:** *Eichhornia crassipes*; pH value; internal phosphorus; release pattern; migration pattern

磷不仅是引起湖泊水体富营养化的主要营养物,也是水体富营养化现象能否发生的主要限制因子之

一<sup>[1-2]</sup>,因此有效降低磷浓度是防治湖泊水体富营养化的关键。早期的富营养化防治多以控制磷输入为重点,注重减少外源磷负荷。研究表明随着监管力度的增大,来自工业、农业、养殖业等排放的外源磷输入得到控制,内源磷释放所造成的二次污染成为湖泊富营养化的重要来源之一,对内源磷释放规律的研究逐渐进入人们的视线<sup>[3-6]</sup>。

凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)是公认的去氮、磷效果最佳的水生植物之一,如何合理利用凤眼莲成为

收稿日期:2014-10-28

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(41201533);国家“水体污染控制与治理”科技重大专项(2012ZX07102-004-002-003);江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(12)5054)

作者简介:王 岩(1984—),女,河北石家庄人,硕士,助理研究员,主要研究方向为富营养化水体污染防治研究。

E-mail: 13578512@qq.com

\*通信作者:张迎颖 E-mail: fly8006@163.com

水体生态修复关注的课题之一<sup>[7-8]</sup>。目前针对凤眼莲和湖泊富营养化磷治理的研究主要可以分为 3 类:(1)在开放性水体大面积种植水生植物,仅从植物生物量增加和水质变化讨论植物的净化效果<sup>[9-11]</sup>,这类研究主要侧重于水体景观效果,而并未将植物-水体-底泥结合起来,也未联系 pH 值、氧化还原电位、温度等外界条件,从去除机理和去除贡献的角度对底泥磷释放进行研究,实验中磷的来源并不明确;(2)以底泥为主要研究对象,研究其内源性磷在多种非植物环境因子变化条件下(如内源磷的组成含量、温度、上覆水、溶解氧、水体扰动等因素)对其释放的直接影响或环境因子通过对微生物和藻类生长对底泥磷释放的间接影响<sup>[12-17]</sup>,这类研究更注重研究影响底泥磷的释放的外部条件,而并未与植物生长结合起来,对磷的去向和下一步净化手段并未进行研究;(3)以室内培养箱中底泥-水体-植物为研究对象<sup>[18]</sup>,从磷平衡和总量的角度讨论系统中磷的去向,这类实验设置的实验条件往往从水体营养盐浓度入手,更注重植物种类的筛选,而并未针对一些对底泥释放有重要影响的外部限制因素进行研究。

本实验结合上述几类实验的不足和优势,以国内鄱阳湖、太湖和滇池等湖体<sup>[13, 19-21]</sup>实际情况为依据,选取不同 pH 值为控制沉积物磷生物有效性和磷释放的不同处理<sup>[15, 22]</sup>,以凤眼莲为系统植物因子,与水体和一定质量的底泥一同组成富营养化水体生态修复系统,研究系统可转移 TP 在不同 pH 值条件下的释放及转化和吸收吸附的变化趋势,对于有效控制沉积磷向水体的释放、一定程度上缓解因内源污染导致的水体富营养化问题具有重要意义,并为凤眼莲生态修复技术在更大范围内的推广应用提供理论参考与实践依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验设计

实验地点设在江苏省南京市江苏省农业科学院内温室,地属亚热带季风湿润气候区,具有气候温和、四季分明、冬冷夏热、雨量充沛、光照充足、热量丰富、雨热同季的特点。

实验植物选择植株较小生长健壮的风眼莲幼苗,底泥来自太湖竺山湾凤眼莲种养区(北纬 31°27'17", 东经 120°04'40"),实验用水来自江苏省农业科学院 2 号塘(北纬 32°02'14.82", 东经 118°51'56.88")。以 200 L 塑料箱(73 cm×52 cm×56 cm)为实验容器,加入干

泥 30 kg(平均初始含磷量为  $1.1018 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ),沿壁缓慢加入实验用水 180 L(平均初始含磷量为  $0.387 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,叶绿素含量为  $1.365 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )并与桶壁做标记,待泥水平衡 3 d 后正式开始实验,放入 1 kg 洗净的风眼莲幼苗(平均初始含磷量为 0.44%),每日用实验室纯净水补充以弥补蒸发损失的水分。实验共 24 个塑料箱(图 1),分为 4 组,用 NaOH 溶液或 HCl 溶液在尽量不扰动底泥的情况下,将水体 pH 值调节到 6.0、7.5、9.0 和 10.5,分别命名为 T1、T2、T3 和 T4,每组处理中有 3 个放入凤眼莲苗,3 个不放苗作为对照(CK),按 pH 值从低到高分别命名为 CKT1、CKT2、CKT3 和 CKT4,如图 1 所示。实验从 2013 年 6 月 28 日开始至 9 月 19 日结束,为期 84 d。

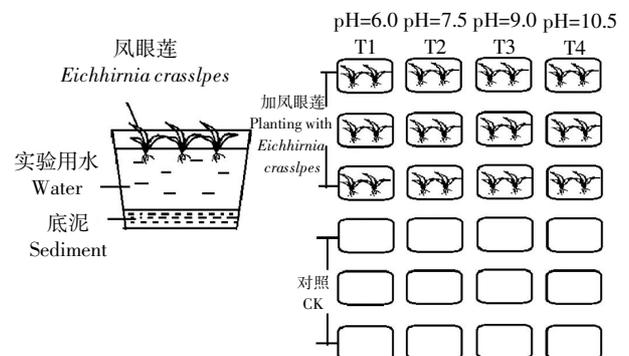


图 1 实验设置说明

Figure 1 Experiments settings

### 1.2 样品采集与分析

塑料桶初始底泥厚度约 13 cm,水深约 35 cm。每隔 7 d 于水面下约 10 cm 处采集 100 mL 水样 1 瓶,采样后将 pH 值调节为处理要求的 pH 值,并以纯净水补充蒸腾、蒸发损失;于实验开始和结束当天用柱状采泥器采集随机于对角两点底泥 0.3~0.5 kg,采样时尽量减少水体扰动;实验开始和结束时采集水样测定叶绿素含量,并称取凤眼莲生物量并采集植物样品,简单清洗后控水后烘干。

水样测定总磷(TP)和 pH 值:TP 采用 SKALAR SAN++型流动分析仪(荷兰)测定,pH 值用便携式笔式 pH 计测定;底泥测定含水量和干泥 TP 含量:含水量采用经典烘干法( $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$ , 24 h),干泥 TP 含量采用硫酸-高氯酸消解、钼锑抗比色法;植物测定含水量和干物质 TP 含量:含水量采用烘干法( $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$  杀青 2 h,  $75^\circ\text{C}$  烘干 72 h),干物质 TP 含量采用硫酸-双氧水消解、钼锑抗比色法。

通过单位计算换算出凤眼莲吸收 TP 总量、水中

TP 含量变化总量和底泥 TP 释放总量,计算公式如下:

(1) 凤眼莲吸收 TP 总量(mg)=最终凤眼莲全株 TP 含量( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) $\times$ 植物最终干重(kg)-初始凤眼莲全株 TP 含量( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) $\times$ 植物初始干重(kg);

(2) 水中 TP 增加总量(mg)=水中 TP 浓度增加量( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) $\times$ 水样体积(L);

(3) 底泥 TP 释放总量(mg)=底泥 TP 变化量( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) $\times$ 底泥干重(kg)。

水样测定叶绿素含量(*Chla*):取 0.1 L 水样用 GF/C 玻璃纤维滤膜(直径 47 mm)过滤,滤膜保存于 10 mL 离心管中,然后往离心管中加入 5 mL 90% 的乙醇,水浴加热 80~85 °C 5 min,取出后避光保存 4~6 h,在紫外分光光度计上于 665 nm 和 750 nm 处测定吸光度,分别记为  $E_{665}$  和  $E_{750}$ ,然后在样品中加入 1 滴盐酸(1:10)溶液进行酸化,1 min 后重新在 665 nm 和 750 nm 波长下测定吸光度,分别记为  $A_{665}$  和  $A_{750}$ 。叶绿素计算公式为:

$$Chla=27.3\times[(E_{665}-E_{750})-(A_{665}-A_{750})]\times V_{乙醇}/V_{样品}$$

其中,*Chla* 指叶绿素 a 浓度( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ); $V_{乙醇}$ 是萃取液定容的体积(5 mL); $V_{样品}$ 是过滤水样的体积(0.1 L)。

### 1.3 数据整理与分析

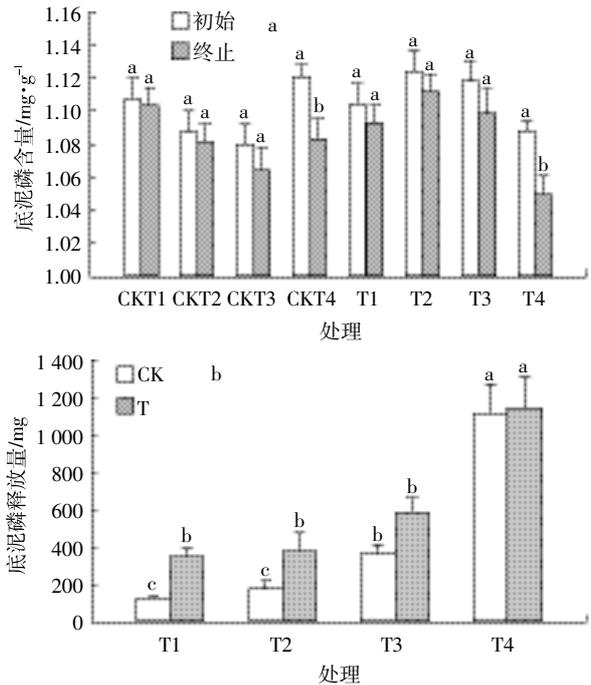
采用 Excel 2003 和 SPSS 10.0 软件进行数据处理,处理间多重比较用 LSD 法。

## 2 结果与分析

### 2.1 系统底泥磷总量的变化

底泥磷初始含量范围为 1.080~1.124  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,实验终止时底泥磷含量范围为 1.050~1.111  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,总体呈下降趋势。如图 2a 所示,pH 值为 10.5 极端条件下,种养凤眼莲与否的实验起始与终止时底泥磷含量间均存在显著性( $P<0.05$ )差异,而 pH 值在 6~9 之间的各处理均未出现显著性( $P<0.05$ )差异。

由图 2b 可以看出,在 4 个空白对照处理中,底泥 TP 释放量的变化规律为:近中性条件下最小,随 pH 值增加,底泥释放量增加,其释放总量依次为 125、177、363 mg 和 1 110 mg。此规律与前人的研究结果基本一致<sup>[22-24]</sup>,即中性条件下磷释放量最小,偏碱条件下磷释放会增加。统计分析结果表明,CKT4 处理的底泥 TP 释放量显著( $P<0.05$ )高于 CKT3,CKT3、CKT4 均显著( $P<0.05$ )高于 CKT1 和 CKT2 处理,而 CKT1 和 CKT2 处理间差异不显著。不同 pH 值主要是通过影响磷在水体中的赋存形式而影响底泥中 P 的释放,沉积物中的无机磷主要分为易交换态磷或弱吸附态磷、



不同字母表示不同处理初始、终止磷显著性差异( $P<0.05$ )

图 2 系统底泥 TP 含量(a)和磷释放量(b)的变化

Figure 2 Changes in the content of total phosphorus (a) and release of total phosphorus (b) in the sediment during the experiment

铁结合磷(Fe-P)和铝结合磷(Al-P)、钙结合磷(Ca-P)以及闭蓄态磷(Oc-P)。当 pH 值在近中性条件下,上覆水中的磷主要以  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  和  $\text{HPO}_4^{2-}$  形态存在,最易被沉积物中金属元素相结合而被沉积物吸附,因此此时释放量最小;而碱性条件下 pH=9~10.5 时,沉积磷的释放以离子交换作用为主,大量  $\text{OH}^-$  的存在,与铁、铝磷酸盐结合体中的磷酸盐相互竞争吸附位置,加剧了磷酸盐的解吸过程,使沉积物中的 NaOH-P 释放出来<sup>[20-21,24]</sup>。

4 个种养水葫芦的处理不仅表现出类似的变化趋势,且释放量均分别大于相同 pH 值下未种植凤眼莲的处理,即随 pH 值增加,其 TP 释放总量分别为 347、379、583 mg 和 1 144 mg,较空白对照处理底泥中 TP 释放量分别增加了 222、202、220 mg 和 34 mg,即底泥释放磷含量分别增加了 7.40、6.73、7.33  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 1.13  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。这可能是由于在实验过程中,凤眼莲吸收水中磷元素进行生长,上覆水中磷素的迁移和减少促进底泥中的磷素通过间隙水向上覆水中扩散。统计分析结果表明:T4 处理的底泥 TP 释放量显著( $P<0.05$ )高于其他 3 个处理,而 T1、T2、T3 处理间的差异不显著。可见,在 pH 值为 6~9 的范围内,种养凤眼莲

对底泥 TP 释放的影响不可忽视,而在高 pH 值下 (pH=10.5), 凤眼莲吸收对底泥 TP 释放的影响不再明显, pH 值对底泥 TP 释放的影响更加显著。

## 2.2 系统上覆水磷总量的变化

由图 3 可知,实验结束时,空白对照处理水体 TP 变化量呈现随 pH 值增加而增加的变化趋势,与初始值相比 CKT1、CKT2、CKT3、CKT4 的 TP 变化量分别为-24.12、-4.32、136.88 mg 和 547.92 mg。CKT1 处理在整个实验过程中水体 TP 含量呈缓慢下降趋势, CKT2 变化趋势为围绕初始值上下小幅波动,其最终 TP 含量均低于初始 TP 含量,同时,CKT1、CKT2 叶绿素含量由最初的  $1.365 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  分别增加到结束时的  $17.745 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $47.775 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 分析系统中的磷去向可能是 8 月中旬水中后来自发生长的浮萍和藻类的吸收吸附;CKT3 在实验开始就表现出明显的增加,从初始的 70.68 mg 增加到 7 月 18 日的 132.12 mg,之后波动性继续增加至 8 月 22 日达到顶值 359.28 mg,此后渐渐降低,实验结束时叶绿素含量增加到  $184.275 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,水中 TP 总量为 207.56 mg,这一结果与郭志勇等<sup>[20]</sup>的研究结果一致,即碱性 pH 值下水体

TP 会有明显的持续性的增加,8 月中下旬可能由于浮萍等生物吸收吸附的原因,水中 TP 含量略有降低;CKT4 处理于实验前期呈现阶段性剧烈增加,至 8 月中旬增长至 576.72 mg,之后基本保持这一总量,此时水体溶解和底泥释放基本达到平衡,实验结束时的 TP 总量为 613.80 mg,叶绿素含量达到  $208.845 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,藻类的吸收可能是系统 TP 的主要去向<sup>[25]</sup>。

种养凤眼莲处理也呈现类似的变化规律,实验结束时 TP 变化量按 pH 值由低到高依次为-43.20、-9.12、88.80 mg 和 558.48 mg,较空白对照水体的最终磷含量分别减少了 0.11、0.03、0.27  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和 -0.06  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。具体来看,T1 处理在整个实验期间水体磷总量并未出现剧烈的变化,整体减少趋势比较平缓,对水体的净化量高于其对照试验 CKT1;T2 处理在前 40 d TP 含量略有降低,在 8 月下旬出现短暂上升后含磷总量渐渐降至初始水平,分析可能是由于当时实验箱出现质量问题,后经修补后重新加水对体系的底泥产生扰动的缘故,实验结束时,水中 TP 含量平均值为 70.56 mg,略低于本处理初始 TP 总量 79.68 mg,净化效果略优于其对照实验;T3 处理的水体磷总量在实验开始的时候出现短暂的降低,然后在 8 月 2 日—8 月 30 日期间有所升高,峰值出现的日期晚于其对照 CKT3 且数值(234.24 mg)也低于 CKT3,之后 TP 浓度略有降低,结束时处理的平均总含量为 158.64 mg,这可能是由于实验前期凤眼莲快速生长,从水体吸收大量营养元素,进一步促进底泥中的磷向水中释放,而到实验中期时植物生长速度减缓除磷速率降低,TP 含量曲线表现为升高,此时系统中主要以底泥释放作用为主,当凤眼莲吸收和底泥释放达到动态平衡时 TP 曲线表现为最终的平缓区;T4 处理的含磷总量表现为从实验开始至 8 月 8 日有迅速且明显升高,之后一直到实验结束保持基本不变的趋势,结束时水中磷总量 633.96 mg,明显高于实验初始 P 含量 75.48 mg,净化量低于 CKT4,可能是由于 pH 值过高底泥磷释放量最大,且高 pH 值导致凤眼莲生长状态不好,从实验开始时就有部分植物陆续死亡腐烂,加重对水体 TP 的释放,所以在图 3 中只出现的快速增长区(底泥释放为主)和稳定区(吸附吸收和释放达到平衡),前期水中 TP 的增加速度也快于空白 CKT4。

## 2.3 不同 pH 值下凤眼莲的吸磷量

根据初始和结束时的凤眼莲生物量与含磷量,计算整个实验过程中凤眼莲吸收的磷总量(表 1)。4 个

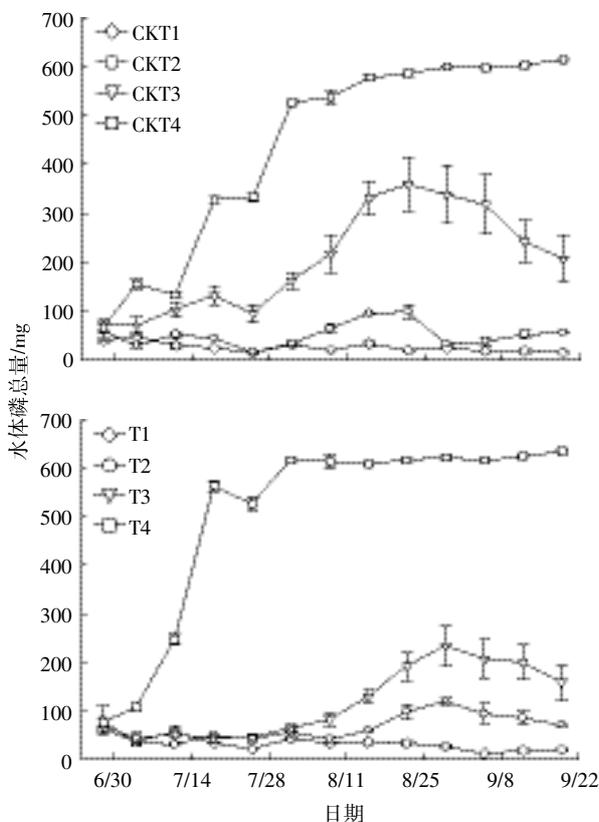


图 3 各处理水体磷总量的变化

Figure 3 Changes in the summation of total phosphorus in the water during the experiment

处理的凤眼莲生物量按 pH 值由低到高依次为 4.386、3.162、2.766 kg 和 1.982 kg。从凤眼莲长势上看, T1 处理的凤眼莲长势最好; T2 长势次之; T3 处理在实验期间凤眼莲叶片上出现斑点, 导致最终长势不如前 2 个处理; T4 处理的凤眼莲长势最差, 从实验开始时就有植株死亡, 至实验结束时已经大量死亡, 收集到少量活植株, 部分样品因腐烂脱落或在清洗时有部分损失而未能全部收集。就凤眼莲吸收磷总量而言, 按 pH 值由低到高依次分别为 285.3、307.0、446.9 mg 和 -53.7 mg (表 2)。就凤眼莲的生物量和干物质含磷量来看, pH 值范围在 6.0~9.0 之间时, 随着 pH 值增加凤眼莲生物量虽有降低, 但干物质含磷量增加显著, 故凤眼莲吸收磷总量呈增加趋势, 而 pH 值为 10.5 的极端条件下呈现凤眼莲植株磷释放现象, 主要是由于本实验条件下该 pH 值已严重影响凤眼莲生长的缘故。

#### 2.4 不同处理系统中的 TP 平衡

本实验条件下, 不同 pH 值处理底泥-水体-凤眼莲系统中磷的源和汇存在差异 (表 2)。具体来看, T1 和 T2 处理中, 底泥和水体中的 TP 均表现为释放和减少的趋势, 其中底泥释放是系统可转移 TP 主要来源, 凤眼莲吸收吸附的 TP 量表现为增加, 分别占系

统可转移 TP 来源的 73.12% 和 79.06%, 是系统可转移 TP 的主要去向; 而 T3 处理中, 底泥的 TP 表现为释放, 其释放量高于前两个处理, 为系统 TP 的唯一来源, 水体 TP 变化量和凤眼莲 TP 吸收量均表现为正值, 分别占底泥释放量的百分比分别为 15.23% 和 76.67%, 其中植物吸收依然是系统 TP 的主要去向, 另外其他途径净化比例占 8.1%; 分析 T1、T2 和 T3 处理均有少部分 TP 不知去向, 可能由水体中生长的漂浮植物 (如凤眼莲、浮萍) 或藻类的吸收吸附作用或者是以悬浮物和有机磷的形式存在引起的。另外, T4 处理中, 底泥和植物分别表现为释放和负吸收, 分别占总量的 95.5% 和 4.5%, 其中底泥释放为系统可转移 TP 的主要来源, 植物由于生长状态不好腐烂分解也向系统中释放 TP, 加剧水质恶化, 导致水体 TP 增加, 另外由于腐烂的植物不能完全打捞出来, 并且在采样清洗时也有部分损失, 因而可能有将近 46.6% 的磷以颗粒态形式存在于体系中或损失于采样过程中。

### 3 讨论

在自然环境里, pH 值为不可控条件, 各地由于地理位置、气候条件等原因, 天然水体中的 pH 值有一定差异, 往往在一定范围内波动, 例如云南滇池水体

表 1 各处理凤眼莲吸磷量

Table 1 The uptake of total phosphorus of *Eichhirnia crassipes* under the different treatments

处理	部位	生物量 /kg	干物质含量 /%	干物质含磷量 /mg·g <sup>-1</sup>	含磷量 /mg	含磷总量 /mg
初始	茎叶	0.816 ± 0.021d	5.4 ± 0.22a	4.40 ± 0.04a	193.9 ± 14.27c	229.5 ± 17.39c
	根	0.184 ± 0.012c	4.3 ± 0.19a	4.50 ± 0.03a	35.6 ± 3.12b	
T1	茎叶	2.480 ± 0.038a	6.5 ± 0.33a	2.58 ± 0.02b	413.3 ± 43.09b	514.8 ± 29.53b
	根	1.906 ± 0.154a	3.9 ± 0.08a	1.38 ± 0.02a	101.5 ± 15.61a	
T2	茎叶	2.123 ± 0.031b	5.8 ± 0.14a	3.59 ± 0.03b	440.7 ± 42.73b	536.5 ± 41.71b
	根	1.039 ± 0.133b	4.2 ± 0.25a	2.18 ± 0.02a	95.8 ± 2.39a	
T3	茎叶	1.769 ± 0.063c	6.3 ± 0.21a	5.04 ± 0.05a	565.4 ± 24.09a	676.4 ± 42.05a
	根	0.997 ± 0.017b	4.6 ± 0.17a	2.41 ± 0.04a	111.0 ± 19.44a	
T4	茎叶 + 根	1.982 ± 0.074	4.8 ± 0.15	1.85 ± 0.03	175.8 ± 10.17	175.8 ± 10.17c

注: 不同字母表示不同处理茎叶、根显著性差异 ( $P < 0.05$ )。

表 2 不同 pH 值下底泥-水体-凤眼莲系统的 TP 释放与迁移量

Table 2 The migration and release amount of TP in sediment-water-*Eichhirnia crassipes* system under different pH value

处理	凤眼莲吸收 TP 量 /mg	水体 TP 增加量 /mg	底泥 TP 释放量 /mg	植物吸收占系统可转移 TP 的比例 /%
T1	285.3 ± 29.53b	-43.2 ± 7.39c	346.9 ± 50.85b	73.12 ± 3.86a
T2	307.0 ± 41.71b	-9.12 ± 12.11c	388.3 ± 95.82b	79.06 ± 4.78a
T3	446.9 ± 42.50a	88.8 ± 26.81b	582.9 ± 77.14b	76.67 ± 6.24a
T4	-53.7 ± 10.17c	558.48 ± 8.83a	1 144.4 ± 168.22a	—

注: 不同字母表示不同处理差异显著 ( $P < 0.05$ )。

pH 值为 7.99~8.97<sup>[13]</sup>,太湖梅梁湾水体 pH 值为 7.55~10.10<sup>[26]</sup>,pH 值虽然无法人为控制,但却是影响底泥 TP 释放的重要因素,它可以通过影响底泥中金属的固定和溶解、以及生物的吸收与转化来影响底泥中磷的固化与释放,也有研究指出底泥中的有机态磷在碱性条件下也更容易被释放出来<sup>[27]</sup>。因此在更广 pH 值范围内研究底泥 TP 释放规律和 TP 去向问题显得尤为重要,对凤眼莲净化技术在更广范围内推广也有指导意义。

本实验过程中底泥均呈现磷释放,但不同 pH 值下底泥中磷的释放程度不同。即碱性条件下 TP 释放最多,中性条件下 TP 释放最少,这与金相灿等<sup>[28]</sup>、郭志勇等<sup>[29]</sup>的研究结果相似,且种养凤眼莲时均比空白对照底泥释放的磷更多。这主要是由于未种养凤眼莲处理仅有有限的自然生长藻类和微生物等对磷进行生物利用,这对上覆水和间隙水中磷吸收有限,对底泥磷释放的促进作用也不及种养凤眼莲对系统中磷的吸收作用明显;而种养凤眼莲时,凤眼莲会从水中或悬浮颗粒物中吸收吸附磷养分供自己生长,通过扩散作用进一步促进底泥中磷的释放。另有研究<sup>[29]</sup>表明高光照条件下沉积物上方形成的藻膜会在一定程度上阻挡沉积物中的磷进入上覆水,进而抑制底泥中磷的释放,但凤眼莲的存在还会通过营养竞争、根基分泌物和遮光等因素影响藻类的生长和藻膜的形成<sup>[27,30]</sup>,进一步促进底泥中 TP 释放。

在本实验条件下,水体 TP 含量的增减并不单独取决于凤眼莲 TP 吸收量或者底泥 TP 释放量,而是他们之间相互平衡后的外观体现。当凤眼莲对 TP 吸收吸附能力大于底泥 TP 的释放能力时,水体表现为水质变好(TP 含量降低),变好和降低的程度均优于空白对照,这种情况在 T1 和 T2 及其对照处理就可以看出;当凤眼莲吸收吸附能力小于底泥 TP 的释放能力时,水体表现为水质渐渐变差(TP 含量升高),但 TP 升高程度和速度均小于空白对照,这种情况在 T3 处理中可以看到;当凤眼莲吸收吸附能力远远小于该 pH 值下底泥 TP 的释放能力时,水体水质会迅速变差,植物死亡腐烂分解,某些藻类在碱性条件下(pH=9~10)释放的碱性磷酸酶将颗粒态和溶解态的物质作为底物,或从死亡的有机物中分解释放出正磷酸盐<sup>[31-33]</sup>,从而使水中 TP 含量高于空白对照,这种情况在 T4 处理中表现的比较明显。

不同 pH 值下,凤眼莲-水体-底泥系统 TP 的各迁移转化途径和比例均不相同。在本实验条件下,各

处理系统中可转移 TP 主要来源于底泥释放,且 pH 值越高释放量越大。在凤眼莲正常生长的前提下(如 T1、T2、T3 处理),凤眼莲吸收吸附是系统 TP 的主要去向,分别占本系统可转移 TP 的 73.12%、79.06% 和 76.67%;当凤眼莲无法正常生长时(T4 处理),凤眼莲植株腐烂分解也成为系统 TP 的来源之一。当植物吸收量大于底泥释放量时,水体 TP 可能是系统可移动 TP 的来源之一;当植物吸收量小于或远远小于底泥释放量时,水体 TP 也是系统可移动 TP 的重要去向之一。整个实验中仍有部分 TP 去向不明,这些 TP 可能是通过浮游植物(如凤眼莲、浮萍)、藻类或微生物等的生化利用或以悬浮物和有机磷的形式<sup>[25,33-34]</sup>存在于系统中。

#### 4 结论

底泥 TP 的释放受 pH 值影响较大,即碱性条件下磷释放量大,近中性条件下磷释放量较小。在 pH 值为 6.0~9.0 时,种养凤眼莲较空白对照处理有利于促进底泥中磷释放,其增加释放磷含量在 6.73~7.40 mg·kg<sup>-1</sup> 之间,有利于增大水体磷降低幅度,其降低范围在 0.03~0.27 mg·L<sup>-1</sup> 之间;且凤眼莲吸收吸附磷是系统可移动磷的主要去向,占系统可移动磷的 73.12%~79.06%。另外,实验中 pH 值为 10.5 极端条件下,不利于凤眼莲生长,随着时间推移,凤眼莲逐渐死亡腐烂产生的磷也是系统可移动磷的来源之一。水体 TP 变化是底泥释放和凤眼莲吸收作用平衡后的外观表现,并不单独决定于某一因素。

#### 参考文献:

- [1] Worsfold P J, Gimbert L J, Mankasingh U, et al. Sampling, sample treatment and quality assurance issues for the determination of phosphorus species in natural water and soils[J]. *Talanta*, 2005, 66(2): 273-293.
- [2] Rydin E, Malmaeus J M, Karlsson O M, et al. Phosphorus release from coastal Baltic Sea sediments as estimated from sediment profiles[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 92(1): 111-117.
- [3] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment[J]. *Water Research*, 2000, 34(7): 2037-2042.
- [4] 陈 纯,刘红涛,吴孟李,等.竹银水库库底氮磷营养盐释放潜力研究[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(10): 1701-1705.  
CHEN Chun, LIU Hong-tao, WU Meng-li, et al. Nutrient release from different soils in Zhuyin a newly commissioned reservoir in Macau, China[J]. *Ecology and Environment*, 2013, 22(10): 1701-1705.(in Chinese)
- [5] 尹大强,覃秋荣,阎 航.环境因子对五里湖沉积物磷释放的影响[J]. *湖泊科学*, 1994, 6(3): 240-245.  
YIN Da-qiang, TAN Qiu-rong, YAN Hang. Effects of environmental fac-

- tors on release of phosphorus from sediments in WuLi Lake[J]. *Journal of Lake Sciences*, 1994, 6(3): 240-245.(in Chinese)
- [6] 刘晋勇. 富营养化人工湖底泥磷的形态及迁移转化规律的研究[D]. 北京: 清华大学, 2008: 1-2.  
LIU Jin-yong. Study on form, migration and conversion of phosphorus in eutrophic artificial lake sediments[D]. Beijing: Tsinghua University, 2008: 1-2.(in Chinese)
- [7] Polprasert C, Khatiwada N R. An integrated kinetic model for water hyacinth ponds used for wastewater treatment[J]. *Water Research*, 1998, 32(1): 179-185.
- [8] 李文朝. 富营养水体中常绿水生植被组建及净化效果研究[J]. 中国环境科学, 1997, 17(1): 53-57.  
LI Wen-chao. Construction and purification efficiency test of an evergreen aquatic vegetation in an eutrophic lake[J]. *China Environmental Science*, 1997, 17(1): 53-57.(in Chinese)
- [9] 王锦旗, 郑有飞, 宋玉芝, 等. 不同盖度凤眼莲对 2 种水流模式下水体净化效果比较[J]. 生态环境学报, 2012, 21(1): 124-129.  
WANG Jin-qi, ZHENG You-fei, SONG Yu-zhi, et al. Purification effect of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) coverage on the different flow properties water bodies[J]. *Ecology and Environment*, 2012, 21(1): 124-129.(in Chinese)
- [10] 于晓章. 环境污染治理领域中的植物修复技术[J]. 生态科学, 2004, 23(3): 256-260.  
YU Xiao-zhang. Review of phytoremediation as a treatment technique for cleaning contaminated environmental media[J]. *Ecologic Science*, 2004, 23(3): 256-260.(in Chinese)
- [11] 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)
- [12] 张学杨, 张志斌, 李梅, 等. 影响湖泊内源磷释放及形态转化的主要因子[J]. 山东建筑大学学报, 2008, 23(5): 456-459.  
ZHANG Xue-yang, ZHANG Zhi-bin, LI Mei, et al. Affecting factors on the inner sediment phosphorus release and phosphorous species in shallow lakes[J]. *Journal of Shandong Jianzhu University*, 2008, 23(5): 456-459.(in Chinese)
- [13] 东野脉兴, 樊竹青, 张灼, 等. 滇池微生物解磷与聚磷作用的实验研究及磷的现代沉积与微生物的成矿作用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2003, 33(3): 282-289.  
DONGYE Mai-xing, FAN Zhu-qing, ZHANG Zhuo, et al. Experimental researches on phosphorus decomposing and concentrating of microorganism in Dianchi Lake: an example of modern phosphorus deposition and microorganism mineralization[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2003, 33(3): 282-289.(in Chinese)
- [14] 刘兵钦, 王万贤, 宋春雷, 等. 菹草对湖泊沉积物磷状态的影响[J]. 武汉植物学研究, 2004, 22(5): 394-399.  
LIU Bing-qin, WANG Wan-xian, SONG Chun-lei, et al. Influences of *Potamogeton crispus* L. on phosphorus status in lake sediments[J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2004, 22(5): 394-399.(in Chinese)
- [15] 吴文颖, 袁龙义, 厉恩华, 等. 富营养化湖泊沉积物磷释放特点及水生植物对其的影响[J]. 湖北农业科学, 2007, 46(6): 1031-1034.  
WU Wen-ying, YUAN Long-yi, LI En-hua, et al. Effects of aquatic macrophyte on phosphorus in lake sediment[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2007, 46(6): 1031-1034.(in Chinese)
- [16] 杨逢乐, 吴文卫, 陈建中, 等. 滇池沉积物中磷的释放行为研究[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(11): 48-52.  
YANG Feng-le, WU Wen-wei, CHEN Jian-zhong, et al. Release behavior of phosphate in Dianchi sediment[J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, 32(11): 48-52.(in Chinese)
- [17] 姜敬龙, 吴云海. 底泥磷释放的影响因素[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(6): 43-46.  
JIANG Jing-long, WU Yun-hai. The factors on release of phosphorus from the sediment[J]. *Environmental Science and Management*, 2008, 33(6): 43-46.(in Chinese)
- [18] 吴湘, 叶金云, 杨肖娥, 等. 生态浮岛植物在富营养化养殖水体中去磷途径的初步分析[J]. 水产学报, 2011, 35(6): 905-910.  
WU Xiang, YE Jin-yun, YANG Xiao-e, et al. Ways of phosphorus removal from eutrophic aquaculture water by ecological floating culture plants[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2011, 35(6): 905-910.(in Chinese)
- [19] 胡茂林. 鄱阳湖湖口水位、水环境特征分析及其对鱼类群落与洄游的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2009: 8-9.  
HU Mao-lin. Characteristics of water level, water environment and effects on fish communication and migration in the Hukou area of Poyang Lake[D]. Nanchang: Nanchang University, 2009: 8-9.(in Chinese)
- [20] 郭志勇, 李晓晨, 王超, 等. pH 值对玄武湖沉积物中磷的释放及形态分布的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 873-877.  
GUO Zhi-yong, LI Xiao-chen, WANG Chao, et al. Influence of pH value on the release and the chemical fractions of phosphorus in sediments of Xuanwu Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3): 873-877.(in Chinese)
- [21] 李兵, 袁旭音, 邓旭. 不同 pH 条件下太湖入湖河道沉积物磷的释放[J]. 生态与农村环境学报, 2008, 24(4): 57-62.  
LI Bing, YUAN Xu-yin, DENG Xu. Phosphorus release of sediments in in-flowing rivers of the Taihu Lake as affected by pH[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2008, 24(4): 57-62.(in Chinese)
- [22] 张登峰, 鹿雯, 王盼盼, 等. 沉积磷在不同 pH 水平下的释放与转化规律[J]. 安全与环境学报, 2008, 8(1): 1-5.  
ZHANG Deng-feng, LU Wen, WANG Pan-pan, et al. On release and transformation regularity of phosphorus sediment with different pH values[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2008, 8(1): 1-5.(in Chinese)
- [23] 刘静静, 汪家权. 巢湖内源磷释放特点、稳定性及化学控制研究[J]. 环境科学研究, 2006, 19(5): 59-64.  
LIU Jing-jing, WANG Jia-quan. Study on rule of phosphorus release and stability in Chaohu Lake[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2006, 19(5): 59-64.(in Chinese)
- [24] 任万平, 李晓秀, 张汪寿. 沉积物中磷形态及影响其释放的环境因素研究进展[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(9): 53-60.  
REN Wan-ping, LI Xiao-xiu, ZHANG Wang-shou. Research progress

- in phosphorus forms in sediments and environmental factors that influence phosphorus releasing[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2012, 34(9): 53-60.(in Chinese)
- [25] 岳 涛, 张德禄, 胡春香. 太湖 3 种优势微囊藻对不同形态磷的吸收利用[J]. 湖泊科学, 2014, 26(3): 379-384.  
YUE Tao, ZHANG De-lu, HU Chun-xiang. Utilization of phosphorus in four forms of the three dominant microcystis morphospecies in Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Science*, 2014, 26(3): 379-384.(in Chinese)
- [26] 高 光, 秦伯强, 朱产伟, 等. 太湖梅梁湾中碱性磷酸酶的活性及其与藻类生长的关系[J]. 湖泊科学, 2004, 16(3): 245-251.  
GAO Guang, QIN Bo-qiang, ZHU Chan-wei, et al. Seasonal variation of alkaline phosphatase activity in Meiliang Bay, Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2004, 16(3): 245-251.(in Chinese)
- [27] 姚 扬, 金相灿, 姜 霞, 等. 光照对湖泊沉积物磷释放及磷形态变化的影响研究[J]. 环境科学研究, 2004(S1): 30-33.  
YAO Yang, JIN Xiang-can, JIANG Xia, et al. Study on effects of light on phosphorus release and phosphorus form change in lake sediments [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2004(S1): 30-33.(in Chinese)
- [28] 金相灿, 王圣瑞, 庞 燕. 太湖沉积物磷形态及 pH 值对磷释放的影响[J]. 中国环境科学, 2004, 24(6): 707-711.  
JIN Xiang-can, WANG Sheng-rui, PANG Yan. The influence of phosphorus forms and pH on release of phosphorus from sediments in Taihu Lake[J]. *China Environmental Science*, 2004, 26(6): 707-711.(in Chinese)
- [29] 何 江, 孙 英, 吕昌伟, 等. 岱海表层沉积物中内源磷的释放[J]. 生态学报, 2010(2): 389-398.  
HE Jiang, SUN Ying, LÜ Chang-wei, et al. Research on phosphorus re-
- lease from the surface sediments in the Daihai Lake[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010(2): 389-398.(in Chinese)
- [30] 孙文浩, 俞子文, 余叔文. 城市富营养化水域的生物治理和凤眼莲抑制藻类生长的机理[J]. 环境科学学报, 1989(2): 188-195.  
SUN Wen-hao, YU Zi-wen, YU Shu-wen. The harness of an eutrophic water body by water-hyacinth[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1989(2): 188-195.(in Chinese)
- [31] 张胜花, 常军军, 孙珮石. 水体藻类磷代谢及藻体磷矿化研究进展[J]. 生态环境学报, 2013, 22(7): 1250-1254.  
ZHANG Sheng-hua, CHANG Jun-jun, SUN Pei-shi. Phosphorus cycle of algae during its growth and death process: phosphorus uptake and release[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(7): 1250-1254.(in Chinese)
- [32] 周易勇, 付永清. 水体磷酸酶: 来源、特征及其生态学意义[J]. 湖泊科学, 1999, 11(3): 274-282.  
ZHOU Yi-yong, FU Yong-qing. Phosphatases in natural water: origin, characteristics and ecological significance[J]. *Journal of Lake Sciences*, 1999, 11(3): 274-282.(in Chinese)
- [33] 尹 军, 王建辉, 王雪峰, 等. 污水生物除磷若干影响因素分析[J]. 环境工程学报, 2007, 1(4): 6-11.  
YIN Jun, WANG Jian-hui, WANG Xue-feng, et al. Influencing factors of biological phosphorus removal in sewage treatment[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2007, 1(4): 6-11.(in Chinese)
- [34] Schulz M, Kozerski H P, Pluntke T, et al. The influence of macrophytes on sedimentation and nutrient retention in the lower river spree (Germany)[J]. *Water Research*, 2003, 37(3): 569-578.