

水葫芦生态工程措施对太湖竺山湖水环境修复效果的研究

刘国锋^{1,2}, 包先明³, 吴婷婷¹, 韩士群^{1*}, 肖敏¹, 严少华^{1*}, 周庆¹

(1.江苏省农业科学院农业资源与环境研究所,南京,210014; 2.中国水产科学研究院淡水渔业研究中心,农业部淡水渔业和种质资源利用重点实验室,江苏 无锡 214081; 3.淮北师范大学生命科学院,安徽 淮北 235000)

摘要:采取以水葫芦(*Eichhornia crassipes* Solms)等为代表的生态工程措施净化污染水体,成为污染水体治理的发展趋势。在太湖流域,虽然已有多年的工程措施经验,但尚无针对该种生态工程措施实施过程中对水质改善影响的系统性研究,为此对2011年太湖竺山湖种养66.7 hm²水葫芦期间水体营养盐吸收和水质净化效果进行了调查研究,结果表明:受风浪扰动等水文气象条件的影响,工程区内外水体交换强烈,水体透明度、pH等基本理化指标变化不明显,水葫芦种养区内未出现厌氧现象,水葫芦工程措施对颗粒物及蓝藻具有滞留效果,使得水葫芦种养区水体TN、TP含量较高,其变化幅度分别为1.13~3.30、0.085~0.165 mg·L⁻¹,低于外围水体中TN、TP含量;受气温及水流等影响,水体中蓝藻密度在8月份达到高峰,放养区内叶绿素含量为77.97 mg·m⁻³,同期边缘和外围含量分别为84.40、86.84 mg·m⁻³,植物根部叶绿素含量较高,表明水葫芦根须对蓝藻细胞具有较强的拦截作用。全年收获20 000 t水葫芦,从水体中共带出N、P、K的量分别为19.8、2.4、44.5 t,表明规模化种养以水葫芦等为代表的生态工程措施具有较好的水体净化功能,为扩大利用水葫芦等速生漂浮植物建立的“移动湿地式”生态工程措施治理较大面积富营养化水体提供了依据。

关键词:生态工程;水葫芦;氮;磷;净化效果

中图分类号:X524 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)02-0352-09 doi:10.11654/jaes.2015.02.020

Purification of Water in Zhushan Bay of Taihu Lake with Water Hyacinth Ecological Engineering

LIU Guo-feng^{1,2}, BAO Xian-ming³, WU Ting-ting¹, HAN Shi-qun^{1*}, XIAO Min¹, YAN Shao-hua^{1*}, ZHOU Qing¹

(1.Institute of Agricultural Resource and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Science, Nanjing 210014, China; 2.Key Laboratory of Freshwater Fisheries and Germplasm Resources Utilization, Ministry of Agriculture, Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, China; 3.College of life science, Huaibei Normal University, Huaibei 235000, China)

Abstract: Ecological engineering measures, using fast-growing floating plants to purify polluted water, have become efficient and effective methods to restore water environment. Here, effects of water hyacinth on nutrient absorption and purification of water in Zhushan Bay, Taihu Lake, were investigated in 2011. Results showed that transparency, pH and oxygen deficit of water in hyacinth areas were not significantly different from those in no-hyacinth area, due to wave disturbance and strong water exchange. However, water hyacinth roots had a strong ability to absorb suspended solids and algae, and to reduce concentrations of TN and TP in water. Chlorophyll content of water was 77.97 mg·m⁻³ in August in the water hyacinth areas, while it was 84.40 mg·m⁻³ and 86.84 mg·m⁻³ at the edge of and in the area outside water hyacinth, respectively. Total biomass of water hyacinth was 20,000 tons throughout the year, implying that a total of 19.8, 2.4, and 44.5 tons of N, P, and K were removed from the water, respectively. These results suggest using ecological engineering such as floating wetland planted with water hyacinth could remediate water in large area.

Keywords: ecological engineering; water hyacinth; nitrogen; phosphorus; purification effect

收稿日期:2014-09-21

基金项目:国家自然科学基金青年基金(41101525);江苏省自主创新资金(CX(12)5057);国家重大科技专项巢湖水专项(2012ZX07103-005)

作者简介:刘国锋(1979—),男,博士,副研究员,主要研究方向为湖泊水环境污染及生态治理研究。E-mail:308390036@qq.com

* 通信作者:韩士群 E-mail:shqunh@126.com

严少华 E-mail:shyan@jaas.ac.cn

近三十年来,生活污水、畜禽养殖、工业污水等直排导致氮磷等营养盐在河流、湖泊等水体中大量富集,造成水体富营养化,其外在表现之一就是水体中蓝绿藻细胞过度繁殖形成水华及蓝藻聚集死亡引起藻源性黑水团等水污染事件^[1-4],使得其对水质污染产生了质的变化。水体富营养化的主因是过多氮磷从陆地单向流入水体中而积累过多的营养盐,至今人们仍无有效的管理系统和技术手段阻止这一既影响粮食生产安全又损害生态环境和饮水安全的“断裂的生物地球化学循环”^[5-6]。

针对上述水体污染问题及特点,目前已采取了多种治理方式,如底泥疏浚^[7]、引水稀释^[8]、水生植物生态恢复^[9]、改性粘土絮凝^[10]等,在一定范围和时间内取得了较好的效果。然而,针对容积较大、污染严重、水交换周期长的水体,则需要一种高效、环境友好的原位水体水质修复的治理措施与方法。Schwarzenbach等^[11]与Shannon等^[12]分别撰文指出,未来污染水体的治理应以低成本、可持续和环境友好型的方法和措施为发展方向。因此,如何快速、有效地控制和降低水体中营养盐含量、修复受损水体生态、构建健康的水生态环境,成为摆在环境工作者及地方政府决策者面前的亟需解决的具有战略意义的新课题^[13]。

水葫芦,学名为凤眼莲(*Eichhornia crassipes* Solms),曾作为世界十大恶性杂草之一被视为主要的外来入侵物种^[14],然而因其具有扩繁快、适应性强、去污效果显著等优点而成为污染水体治理的优选植物^[15-16]。目前,利用水葫芦修复污染水体等的研究多是在实验室或池塘等小规模实验尺度下进行^[17],在水文气象条件及污染物的含量等具有不可比拟的尺寸和条件下,这些研究结论对在像太湖这样的大水面控养后的实际效果会有极大的区别,在开阔水域设置以种养水葫芦为主的生态治理工程,在受风浪扰动和水体交换作用影响后,水葫芦对水体营养盐的吸收净化、蓝藻的拦截等所得监测结果都会有较大的区别。在太湖流域对以种养水葫芦为代表的速生植物生态治理工程措施的水体净化效果及蓝藻拦截情况已经做了前期研究^[18],主要是在水葫芦种苗投放、形成“群体效应”后开展的研究,而在种苗投放前后及种苗生长过程中对水体净化效果尚未进行系统研究。因此,本研究以在太湖竺山湖进行的水葫芦种养措施为依托,在控养过程中种苗投放前及生长过程中对水体理化因子的影响、尤其是对水体中溶解氧含量的影

响和水体净化效果进行监测调查,通过评价该生态工程措施效果及对关键水质因子的影响,为在太湖流域等扩大实施种养规模、提高水质净化效果提供理论依据。

1 样点布设及样品分析

1.1 植物控养围栏设置

植物控养围栏采用桩基钢管围栏进行控制,围栏采用6 m长的镀锌钢管,接口处焊接小环并用扣环联结,两根钢管上下绑有两个泡沫浮球组成一套围栏,若干套围栏可固定成任意形状的水葫芦控养围栏,浮球外面包裹网片,网片下端坠石龙且可下坠到水中1.5 m深处;每隔30 m在钢管两端用绳索固定到暗桩上,以防水葫芦逃逸和减少风浪冲击。在本实验中,水葫芦控养围栏共固定成3条长×宽均为450 m×600 m的控养围栏。

1.2 采样点布设

研究地点设在太湖竺山湖的实验区,本实验区处于武进太滪村与宜兴周铁水域中间位置(距离周铁及太滪岸边各有1.5 km远,见图1)。水葫芦放养区利用不锈钢钢管、围网和锚基暗桩进行固定,以有效防止风浪扰动,保证水葫芦良好生长。共设7个样点进行水样采集、分析,其中远离放养区2个(1号点与8号点,设为对照点),靠近放养区3个(3号点、5号点、7号点,设为近种养),放养区内3个(2号点、4号点、6号点,设为种养);并利用手持GPS定位。

1.3 样品采集及分析处理

水葫芦种苗于5月上旬开始投放,从水葫芦种苗开始投放前的4月进行水样采集,至10月底水葫芦打捞完毕采样结束;每月的上旬和下旬各采集一次水样,用采水器分别采集上层(离湖面0.3 m,种养区内取植物根际处,下同)、中层(0.5 H, H为采样时实测水深)、下层(离湖床0.5 m)三层水样,每层3个重复(下同),然后取其混合样;同时用便携式水质监测仪YSI测定水体的DO、pH、悬浮物含量并观察水体水质情况。

水样采集完毕立即带回实验室进行处理。水样的TN、TP利用碱性过硫酸钾消煮法测定^[19],把水样经GF/C(Whatman)滤纸过滤后利用注射式流动分析仪测定^[20]水溶性 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的含量,叶绿素含量的测定采用热乙醇法测定^[21]。利用Excel 2007和SPSS 19进行数据统计分析,并用Origin 8进行图形绘制。

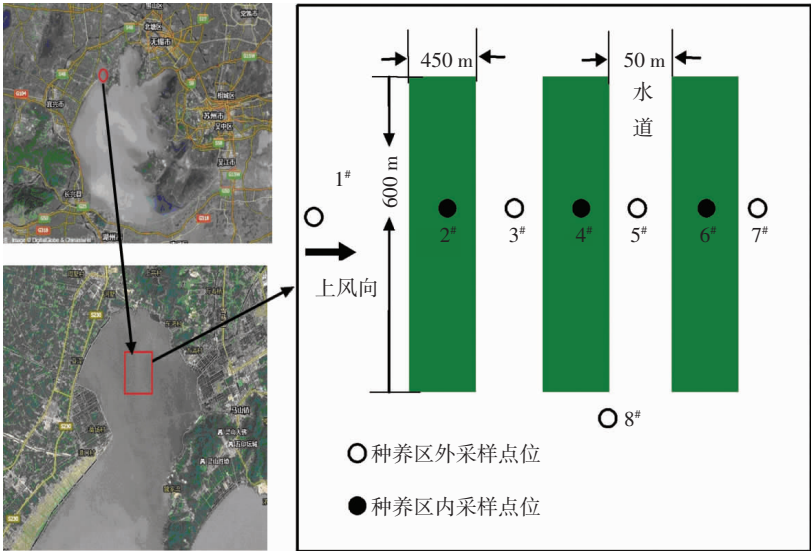


图 1 采样点位示意图

Figure 1 Sampling sites

2 结果与分析

2.1 上覆水 DO、pH 和透明度变化

水葫芦控养地点位于竺山湖水域中间位置,受风浪、水流等影响较大,夏季南风、西南风等经过马山后进入竺山湖中,由于没有山体等阻挡,在较长的风程作用下竺山湖中心水体风浪较大,这为水葫芦控养区内外水体交换提供了较好条件,具体表现在控养区内

外水体中的溶解氧(DO)含量变化差异不大。但在进入 7 月份突然急剧下降(图 2),随后其含量又开始快速上升。前期(4—6 月)水体 DO 含量较高,有助于投入的水葫芦种苗快速繁殖、净化水体;进入 7 月后水体溶氧因蓝藻大量聚集死亡而引起有机物快速分解消耗大量溶解氧,造成水体中溶氧含量快速下降,但仍未低于 $4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 未出现对水体中的鱼类等大型水生生物造成危害的长期缺氧现象。这表明在太湖这

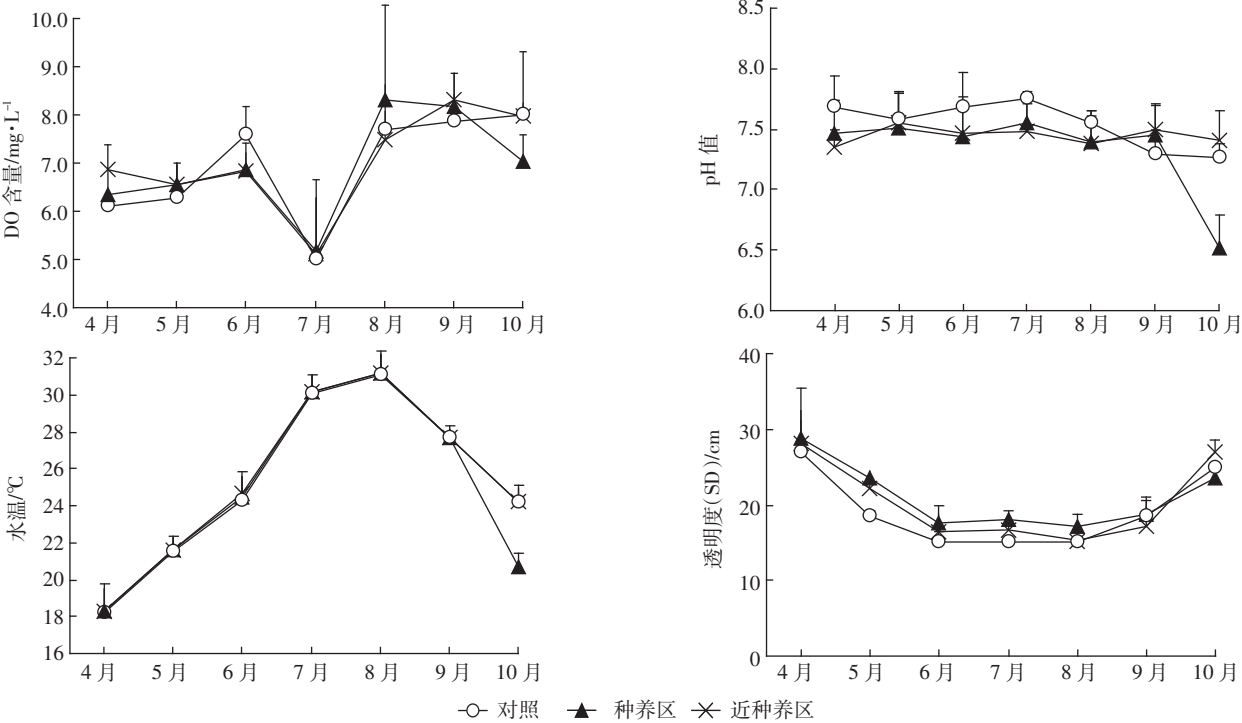


图 2 实验期间上覆水体基本理化参数变化

Figure 2 Changes of DO, pH, temperature and SD in overlying water during experimental period

种受风浪扰动作用强烈、水动力及水交换作用明显的水体中大面积种养水葫芦后不会出现水体大面积缺氧的现象。

水体 pH 值变化幅度不大,基本上在 7.5 左右波动。与对照区(种养区外围水域)相比,生态工程区内及近工程区水体中的 pH 稍低。这是因为随温度升高,水体及底泥中大量蓝藻孢子复苏后开始上浮到水体表面,使得水体的 pH 值较高,有利于藻细胞的生长;水葫芦生长并连接成片形“水葫芦草席”后会改变水体的 pH 值,使得水葫芦种养区水体的 pH 值开始下降^[22],且水葫芦生长过程对水面的覆盖程度直接影响水体 pH 值^[23],从而使得藻细胞周围水体 pH 值发生改变,影响蓝藻细胞的生长^[24],较高的 pH 有利于藻细胞的生长和分裂生长,低 pH 则延缓藻细胞的生长。因此,在水葫芦种养区内及近种养区,水体 pH 值小于外围对照区,与作者前期研究^[18]结果类似。

水体温度变化呈现单峰的变化趋势,从 4 月份水体温度开始升高,到 8 月份达到顶点,种养区内外水体的温度达到 31 °C,随后水体温度开始呈现下降趋势。由于种养区处于竺山湖水体中央,受风浪、水流等的影响,水体交换剧烈,相对于竺山湖水面面积,水葫芦种养工程所覆盖的面积过小(相当于 3% 的覆盖度),种养区内外温度差异不明显。

水体悬浮物含量变化呈现随水葫芦生长而降低的趋势,但仍然表现为水葫芦种养区内要高于种养区边缘和外围,透明度(SD)基本在 20 cm 上下波动。由于进入 5 月水葫芦投放后开始大量的扩繁、生长,在适宜的温度(水温超过 20 °C 时)下其生长速度较快,同时大量的须根可以吸附、拦截或持留水体大量的颗粒物、悬浮物和蓝藻细胞,从而表现为种养区周围及种养区内部水体中的悬浮物含量较高、

透明度下降的变化趋势。这也与水体中蓝藻细胞大量上浮到水体中、形成蓝藻水华现象导致水体中叶绿素含量开始快速增加的变化趋势一致(图 5)。

2.2 水体中 TN、TP 含量变化

从 4 月初至 10 月底水葫芦开始采收后采样结束,在整个样品采集过程中,水葫芦控养区内外水体中蓝藻分布、水体透明度等区别不明显;从水体中营养盐含量的分布结果来看(图 3),上覆水体中 TN 含量从 6 月份开始呈现逐渐增加的趋势,其含量变化幅度在 0.97~1.58 mg·L⁻¹ 之间。靠近种养区和远离种养区的 TN 含量在总体上高于种养区内 TN 含量;随时间变化,水葫芦种养区内外水体中 TN 含量都表现为增加趋势,进入 9 月份后水体中 TN 含量达到整个实验期间最高值,高达 3.50 mg·L⁻¹,但近种养区和种养区内 TN 含量要低于种养区外围。SPSS 相关性分析表明,其差异不显著。

水体中 TP 含量变化也呈现类似变化趋势,4 月期间采集的水样中 TP 含量变化幅度为 0.085~0.107 mg·L⁻¹。随着时间推进,水体中 TP 含量略有增加,5—8 月控养区内部水体的 TP 含量变化幅度较小,其变幅为 0.076~0.139 mg·L⁻¹,同期对照样点中水体的 TP 含量变化幅度为 0.093~0.168 mg·L⁻¹,表现为种养区内部水体中 TP 含量低于种养区外部水体;进入 9 月份后水样中 TP 含量普遍升高,种养区内部、边缘和外部水体中 TP 含量分别达到 0.141、0.145、0.177 mg·L⁻¹;随后其含量逐渐下降,在采样结束时(10 月下旬)种养区内部、边缘和外部水体中 TP 含量分别为 0.136、0.141、0.152 mg·L⁻¹,表现为种养区外围要高于近种养区和种养区内。相关性分析表明,其差异不显著($P>0.05$)。

水体中 TN、TP 初始含量较低、随后增加的原因

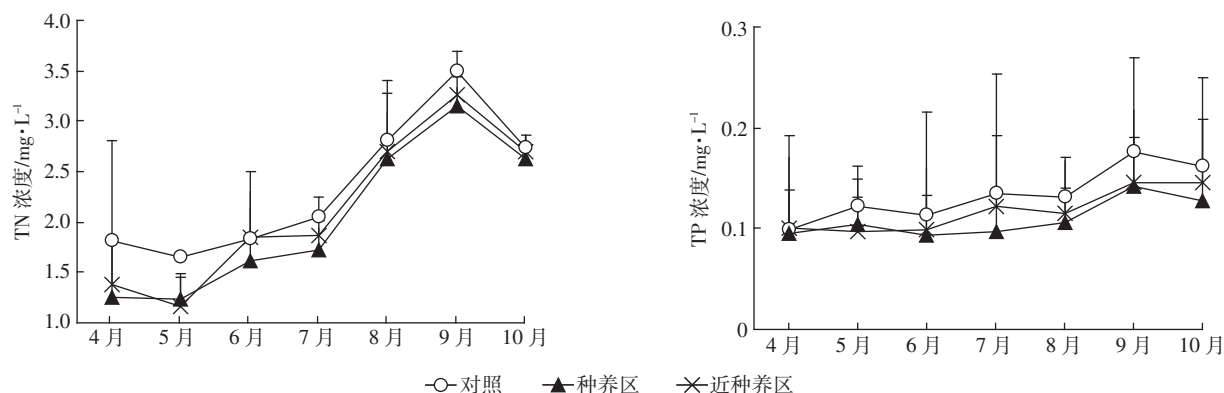


图3 采样期间上覆水体 TN、TP 含量变化

Figure 3 TN and TP dynamics in overlying water during experimental period

是:一方面随着温度升高、光照增加,底泥中的蓝藻孢子、休眠蓝藻细胞开始复苏并向上覆水体中移动、聚集形成藻华^[25-26],大量藻细胞含有丰富的氮磷营养盐,导致水体中营养盐含量增高;另一方面受风浪、湖流等影响的沉积物频繁出现再悬浮过程而致营养物质向上覆水体中释放,造成水体中营养盐含量增加^[27-28]。这些外因常会造成水体中的氮磷营养盐含量过高。进入9月份后,受高温影响,水体中大量蓝藻进入衰亡期,藻细胞中释放出来的氮磷含量对水体中TN、TP含量增加起到了助推作用。但由于种养区处于竺山湖中间位置,风浪扰动和较强的水流作用,使得种养区内外水体交换频繁,表现为种养区内外水体中基本理化参数与营养盐含量差异不大。这也反映了水体中基本理化指标与营养盐的变化趋势。同时,近年来在太湖地区开展的多项水环境综合治理措施,如源头控污、移除重污染企业、引江济太等^[8],也对太湖竺山湖水质改善起到了重要作用,与2009年进行水质调查时相比,水体中TN、TP含量已经有了大幅度的下降。

2.3 上覆水中可溶性营养盐含量变化

水体中溶解性 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、 PO_4^{3-} -P 含量变化如图4所示。从时间变化来看,上覆水中 NO_3^- -N 含量总的变化趋势为在样品采集后期呈现下降趋势,而在前期(4—8月)变化幅度不大。在5—8月,种养区内的 NO_3^- -N 含量变化范围为 $0.56\sim 0.59\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,同期对照样点的 NO_3^- -N 含量变化范围为 $0.58\sim 0.62\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;在9—10月,其含量变化范围为 $0.41\sim 0.53\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,种养区外围对照样点的 NO_3^- -N 含量为 $0.54\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。如前所述,这种现象可能是由于水葫芦大量的须根吸附悬浮物,造成种养区内部水体中 NO_3^- -N 含量高于外部水体。上覆水体中 NH_4^+ -N 含量变化差异较大且无明显的规律性,与水体中 NO_3^- -N 含量变化类似,虽有波动,但变化幅度不大。种养区内部水体中 NH_4^+ -N 含量变化范围为 $0.18\sim 0.30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,同期对照样点的 NH_4^+ -N 含量变化范围为 $0.21\sim 0.31\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,基本上与种养区内部的含量相同。

PO_4^{3-} -P 含量变化呈现前期变化不大,但在后期突然增加的现象。4—8月,种养区内部水体中的 PO_4^{3-} -P 含量变化幅度为 $0.009\text{~}0.034\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,同期对照区水体中的 PO_4^{3-} -P 含量变化幅度为 $0.009\text{~}0.052\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,变化幅度高于种养区内部,但差异不明显。进入9月后,种养区外围对照样点水体中的 PO_4^{3-} -P 含量呈现快速增加的趋势,其变幅为 $0.19\sim 0.26\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,种养区边

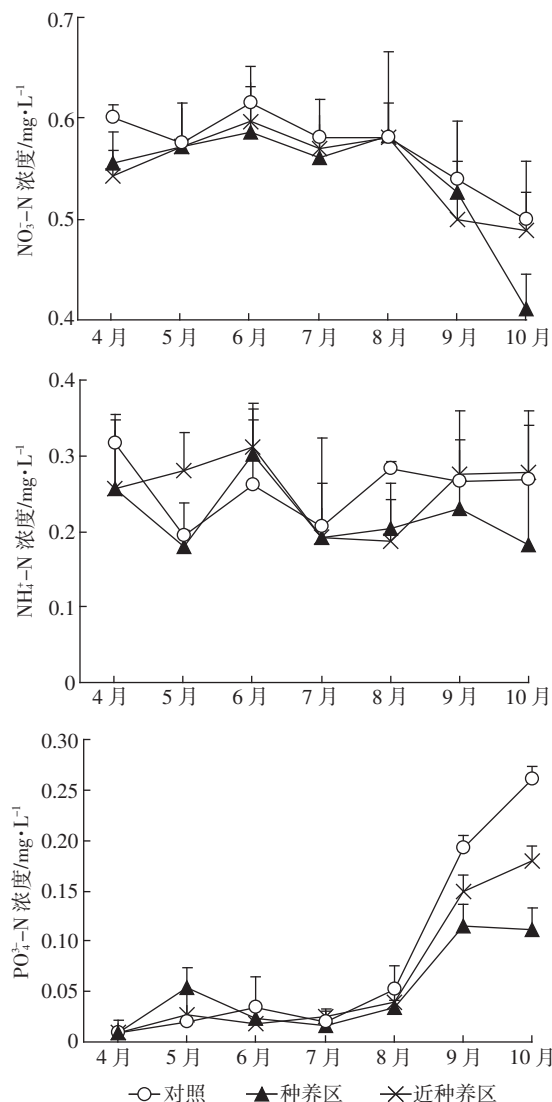


图4 上覆水体 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、 PO_4^{3-} -P 含量变化

Figure 4 Changes of NO_3^- -N, NH_4^+ -N and PO_4^{3-} -P concentrations in overlying water

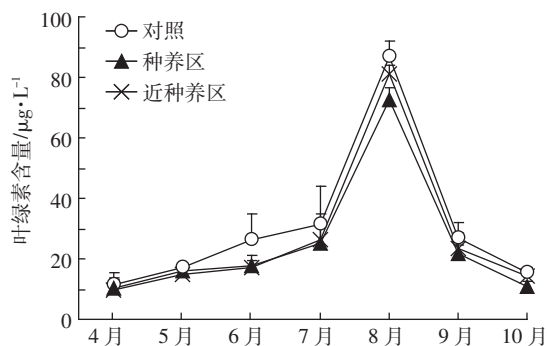


图5 上覆水体叶绿素含量变化

Figure 5 Changes of Chla concentrations in overlying water during experimental period

缘处水体中 PO_4^{3-} -P 含量也表现为快速增加的趋势,其含量由 $0.039\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增至 $0.18\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,变化趋势与

水体中TP含量变化类似。这是因为进入9月后,水体表面漂浮的大量蓝藻细胞死亡分解后释放大量的氮磷营养物质进入到水体中,使得水体中的营养盐含量急剧增加,造成种养区外围及边缘处水体中的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量快速增加的现象。

从空间变化上来看,在水葫芦种养区内部和边缘水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量低于种养区外围,但规律性较差。在种苗投放后,对照样点水体中溶解性的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量均低于种养区内部;进入9月后种养区内部含量低于种养区边缘和外部,到了10月更是表现为种养区内部含量低于种养区外围,甚至也低于种养区的边缘的现象,表明外部水体中较高的营养盐含量起着较大的影响作用。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量的变化趋势基本表现为种养区外围高于种养区内部,4—8月期间采集的水样中其含量较高,随后在9月份出现快速下降,到了10月中下旬其最高含量仅为 $0.50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,种养区内部仅为 $0.41\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。上覆水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量普遍较低,最高也仅为 $0.32\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其变化趋势基本在 $0.25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 上下波动,没有表现出较大的变化幅度。水体中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量变化规律呈现前期较低、9月后快速增加的趋势,水葫芦种养区内部低于种养区边缘和外围水体。这是因为进入9月后,水体中大量的蓝藻细胞进入到衰亡期,藻细胞的分解会释放大量的营养盐到水体中;同时外围水体受风浪、行船扰动后底泥释放、藻细胞的代谢等释放出水溶性的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 而使其含量高于种养区内部。

2.4 水体中叶绿素含量变化

叶绿素浓度变化主要表示了水体中藻细胞的数量,而其含量受气温、光照、温度、风浪等气象因子影响较大^[29]。试验期间水体中藻细胞(主要是蓝绿藻)的浓度用叶绿素来表示,其变化趋势如图5所示。种养区外围叶绿素含量高于边缘及种养区内部;随着温度升高,藻华出现与堆积的现象愈来愈严重,表现为4—8月逐渐升高,在8月达到最高值,其含量高达 $77.7\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$;同期外围水体对照样点中叶绿素含量为 $86.7\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,即放养区外围>放养区内部,但差异不明显;进入9月后,藻细胞受代谢作用和水温等影响,藻细胞开始大量衰亡,叶绿素含量快速下降,种养区内、边缘和外部其含量分别为21.85、23.56、26.65 $\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$;到了10月,虽然水面上仍有大量藻细胞漂浮,但大部分已处于衰亡阶段,因此叶绿素含量持续降低。从水葫芦放养区内外叶绿素含量的变化情况可以看出:受水葫芦根须吸附、拦截等影响,水体流入放养区后,藻

细胞都被持留在放养区内,外围水体中藻细胞数量明显降低;大量藻细胞进入到种养区内被吸附到水葫芦根系上后,刺激水葫芦根系的活力增加^[30];同时水葫芦根系及茎叶等可能会分泌化感物质^[31-32],抑制蓝藻细胞生长,从而实现了污染水体的净化功能。

3 讨论

3.1 规模化种养水葫芦后对营养盐吸收和水质改善的效果

有研究^[33]发现在适宜的温度、光照条件下藻细胞比其他生物能够更有效地利用营养盐,具体表现为蓝绿藻细胞比其他浮游植物对光照、营养盐等具有更强的竞争能力。水华大量发生时,主要细胞种类为具有固氮作用的蓝藻细胞,其可以从空气和水体获得所需营养物质。但在像太湖竺山湖等严重富营养化的水体中,水体营养盐含量已不再是藻华发生的限制因子,只是在不同温度、水文等气象条件影响下,蓝藻水华发生的严重程度不同。在竺山湖放养千亩水面的水葫芦后,蓝藻细胞进入水葫芦种养区后就会被拦截、吸附到水葫芦的须根处;同时因风浪和湖流的扰动作用,水葫芦种养区内部和外围水体不断进行水体交换,因此在整个野外试验期间,利用水质监测结果所得的种养水葫芦的生态工程措施对水质净化的效果不明显;但在种养66.7 hm^2 水葫芦后,可以采收将近20 000 t新鲜水葫芦,其干物质中N、P、K的含量分别按照1.98%、0.24%、4.45%进行计算^[34],直接带出的N、P、K可达19.8、2.4、44.5 t[计算方法:对667 m^2 水面中设定三个样方,测定样方中水葫芦的生物量,并结合实际打捞上岸后水葫芦的生物量进行统计、计算所得,然后对打捞上岸后的水葫芦进行养分分析],表明其具有强大的水体氮磷净化能力。Yi等^[35]研究发现,水葫芦根须引起的藻细胞的呼吸和生物降解作用提供了一个良好的反硝化环境,同时水体和根部溶解氧含量对反硝化作用去除氮起到了关键作用。根据此次调查结果可知(见图2中溶解氧变化所示),水葫芦种养区内外水体中溶解氧差异不明显,即此种条件下不会因种养水葫芦而对水体环境产生不利影响。Hadad等^[36]研究表明,水葫芦等漂浮植物因具有较高的生长速率和对光照、溶氧、营养盐等具有较强的竞争能力,以及较强的分蘖能力,使得它在短期内能够比其他水生植物积累更多的N、P等营养盐,可以从水体中带走更多的营养盐^[37],从而实现污染水体的生态治理,此种漂浮植物常用作污染水体修复的优选植

物^[38]。因此,种养水葫芦不但可以直接改变水体中悬浮物含量、水体透明度等,而且可以从水体中直接带出大量的氮磷,具有快速净化水体功效。相关性分析(表 1)表明,控养水葫芦后,水体几种基本理化指标与水体营养盐之间具有弱相关性,而水体中叶绿素含量与水体透明度、TN、TP 含量有较强的正相关性,但与水葫芦覆盖面积负相关性明显,表明在此种水体环境下,水体中较高的 TN、TP 含量对藻华发生具有较大贡献;水体 TN 含量与水葫芦覆盖面积具有较强的负相关性,表明水葫芦控养后,随着覆盖面积的扩大,其对水体中 TN 含量具有明显消减效果。

3.2 连续种养水葫芦对水体氮磷消减贡献

自 2009 年太湖流域开展利用水葫芦进行污染水体生态治理工作以来,江苏省每年在太湖(以太湖十八湾、太湖竺山湖、宜兴太湖等水域为主)种养的水葫芦控养面积在 933.5 hm²。按照 667 m² 水面可收获 20 t 新鲜水葫芦的生物量来计算,则每年可采收水葫芦的量为 28 万 t。根据盛婧等^[34]研究结果,每平方米水葫芦可从水体中带出 N、P、K 的量分别为 103.61、12.24、234.09 g,N、P、K 的干物质含量按照 1.98%、0.24%、4.45%进行计算,则每年所控养的 933.5 hm² 的水葫芦可从水体中带出的 N、P、K 的总量分别为 277.2、33.6、623 t。自 2009 年始,通过在太湖流域控养水葫芦的方式共计采收水葫芦 84 万 t,从水体中直接取出 N、P 的总量分别为 831.6、100.8 t,具有其他治理措施所不可比拟的优势和治理效果。

3.3 生态工程措施的应用前景

受湖泊流域强烈的人为活动影响,目前我国66%以上的湖泊、水库处于富营养化水平,其中重富营养和超富营养的水体占 22%^[39],使得当前乃至今后相当长一段时间内水体环境的改善及恢复仍是环境保护

的一项重要任务。虽然在“十五”、“十一五”期间,国家与地方投入大量的人力、财力,并采用各种治理方法,对太湖流域进行了综合治理,对水体改善起到了一定效果^[7,40-42],但从物质循环的角度来看,这些措施只能是在一定时间和范围内有效,在较长的时间尺度和空间范围内,仍会出现因营养盐过量累积导致的富营养化现象。而针对较大水域下,采用速生、生物量大、适应性强且易打捞采收利用的漂浮植物,不但具有快速净化水体的功效,而且可机械化作业并资源化处理。水生漂浮植物连同其控养设施,可以视为一个可以“移动”的湿地,可根据污染治理的需要,因地制宜的布置在需要治理的水体中,进而改善目前面临的湖泊等湿地面积不断萎缩的局面。因此,以水葫芦为代表的漂浮植物生态治理工程措施,将会是目前乃至将来水体治理的一个重要发展方向和尝试^[12,37]。虽然目前仍有较多研究者对利用水葫芦修复污染水体持保守乃至怀疑态度,特别是对其在水体修复和治理中的作用仍有争议^[14,16,43],但从 2009 年开始在太湖进行的水葫芦种养调查结果表明,在解决了“控制性放养-机械化采收-资源化再利用”的处理问题后,在太湖等大型、富营养化的浅水湖泊中,受风浪扰动和沉积物再悬浮较为强烈的水体中,种养一定面积的水葫芦后并没有产生许多研究者所担心的问题,诸如底栖生物多样性降低、水体缺氧、水葫芦泛滥等现象^[44-45]。这是因为水葫芦放养面积相对较小,覆盖度尚不足竺山湖水面的3%,而且受附近航道行船及较强的水动力作用等的影响,水体交换和流动性增强,弱化了水葫芦大水面覆盖后可能对水体中溶解氧消耗的不良影响。通过实施以水葫芦种养为主的生态治理工程,水体基本理化性质未出现众多研究者所担心的负面影响。

目前各级政府和研究者的注意力主要集中在如

表 1 水体基本指标与水体营养盐的 Pearson 相关性分析

Table 1 Pearson correlation of basic physical-chemical parameters and nutrients in water

	pH	DO	PA	SD	Chla	TN	NO ₃ -N	NH ₄ ⁺ -N	TP	PO ₄ ³⁻ -P
pH	1									
DO	0.57	1								
PA	-0.69	0.06	1							
SD	-0.39	0.19	0.48	1						
Chla	0.22	-0.42	-0.43	-0.81	1					
TN	0.56	-0.11	-0.77	-0.85	0.81	1				
NO ₃ -N	0.40	0.21	0.11	-0.43	0.45	0.18	1			
NH ₄ ⁺ -N	-0.18	-0.45	-0.06	-0.82	0.63	0.54	0.17	1		
TP	-0.11	-0.40	0.01	-0.71	0.86	0.58	0.44	0.76	1	
PO ₄ ³⁻ -P	-0.16	0.15	0.32	0.41	0.09	-0.15	0.10	-0.41	0.21	1

注:PA 表示水葫芦种养后实际覆盖面积。

何防止水葫芦泛滥和减轻其对社会生产的危害等方面,对如何发挥其对水体中污染物的治理优势研究也大多是在实验室内进行,在较大规模(超过 33.4 hm² 种养水面)的应用或尝试并不多见。作者对进行大面积种养水葫芦后的生态工程措施下的相关研究发现,水体基本理化参数没有出现不良效果,而且作者 2009 年对种养水葫芦期间底栖动物的影响研究结果表明,种养后底栖动物种群多样性增加,指示水体环境改善作用的物种与数量增加,代表水体污染状态的污染指示种的数量明显降低^[46];同时,每年可打捞上岸的水葫芦生物量非常可观,水葫芦可直接从水体中带出大量的氮磷等营养物质,发挥其净化水体的功效。由于利用大水面放养水葫芦仍是一个全新的课题,如何提升其对水体的净化效果、发挥其最佳净化功能,需要做进一步的研究。

4 结论

(1) 种养水葫芦后,水体中无缺氧现象,种养区内部水体的 TP 含量变幅为 0.076~0.139 mg·L⁻¹,对照样点中水体的 TP 含量变幅为 0.093~0.168 mg·L⁻¹,表明水葫芦种养是一种有效的治理措施。

(2) 受水葫芦根系的吸附、拦截等作用,种养区内外蓝藻含量分别达 21.85、26.65 mg·m⁻³,表明水葫芦种养后可有效拦截蓝藻水华。

参考文献:

- [1] 刘国锋,钟继承,何俊,等.太湖竺山湾藻华黑水团区沉积物中 Fe、S、P 的含量及其形态变化[J].环境科学,2009,30(9):2520-2526.
LIU Guo-feng, ZHONG Ji-cheng, HE Jun, et al. Effects of black spots of Dead-Cyanobacterial mats on Fe-S-P cycling in sediments of Zhu Shan Wan, Taihu Lake[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(9):2520-2526.
- [2] Zhang X J, Chen C, Ding J Q, et al. The 2007 water crisis in Wuxi, China; Analysis of the origin[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 182: 130-135.
- [3] Lucie G. Doing battle with the green monster of Taihu Lake[J]. *Science*, 2007, 317(5842):1166.
- [4] Yang M, Yu J, Li Z L, et al. Taihu Lake not to blame for Wuxi's woes[J]. *Science*, 2008, 319(5860):158.
- [5] Elser J, Bennet E. A broken biogeochemical cycle[J]. *Nature*, 2011, 478(7367):29-31.
- [6] 潘纲,代立春,李梁,等.改性当地土壤技术修复富营养化水体综合效果研究: I. 水质改善的应急与长期效果与机制[J].湖泊科学,2012,24(6):801-810.
PAN Gang, DAI Li-chun, LI Liang, et al. Eutrophication control using modified local soil/sand induced ecological restoration technology: I. Effect and mechanism on short and long term improvement of water quality[J]. *J Lake Sci*, 2012, 24(6):801-810.
- [7] 钟继承,刘国锋,范成新,等.湖泊底泥疏浚环境效应: II. 内源氮释放控制作用[J].湖泊科学,2009,21(3):335-344.
ZHONG Ji-cheng, LIU Guo-feng, FAN Cheng-xin, et al. Environmental effect of sediment dredging in lake: II. The role of sediment dredging in reducing internal nitrogen release[J]. *J Lake Sci*, 2009, 21(3):335-344.
- [8] 吴浩云,刁训娣,曾赛星.引江济太调水经济效益分析——以湖州市为例[J].水科学进展,2008,19(6):888-892.
WU Hao-yun, DIAO Xun-di, ZENG Sai-xing. Analysis of benefit of water diversion from Yangtze River to Taihu Lake: Case study in Huzhou city[J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(6):888-892.
- [9] 陈荷生.太湖生态修复治理工程[J].长江流域资源与环境,2001,10(2):173-178.
CHEN He-sheng. Restoration project of the ecosystem in Tai Lake[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2001, 10(2):173-178.
- [10] Pan G, Zhang M M, Chen H, et al. Removal of cyanobacterial blooms in Taihu Lake using local soils: I. Equilibrium and kinetic screening on the flocculation of *Microcystis aeruginosa* using commercially available clays and minerals[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 141(2):195-200.
- [11] Schwarzenbach R P, Escher B I, Fenner K, et al. The challenge of micropollutants in aquatic systems[J]. *Science*, 2006, 313(5790):1072-1077.
- [12] Shannon M A, Bohn P W, Menachem Elimelech, et al. Science and technology for water purification in the coming decades[J]. *Nature*, 2008, 452(7185):301-310.
- [13] Pan G, Dai L, Li L, et al. Reducing the recruitment of sedimented algae and nutrient release into the overlying water using modified soil/sand flocculation-capping in eutrophic lakes[J]. *Environ Sci Technol*, 2012, 46(9):5077-5084.
- [14] 高雷,李博.入侵植物凤眼莲研究现状及存在的问题[J].植物生态学报,2004,28(6):735-752.
GAO Lei, LI Bo. The study of a species invasive plant, water hyacinth (*Eichhornia crassipes*): Achievements and challenge[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(6):735-752.
- [15] Imaoka T, Seiji T. Rates of nutrient uptake and growth of the water hyacinth [*Eichhornia crassipes* (mart.) Solms][J]. *Water Research*, 1988, 22(8):943-951.
- [16] Malik A. Environmental challenge vis a vis opportunity: The case of water hyacinth[J]. *Environment International*, 2007, 33:122-138.
- [17] Yi Q T, Hur C, Kim Y. Modeling nitrogen removal in water hyacinth ponds receiving effluent from waste stabilization ponds[J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35:75-84.
- [18] 刘国锋,张志勇,严少华,等.大水面放养水葫芦对太湖竺山湖水环境净化效果的影响[J].环境科学,2011,32(5):1299-1305.
LIU Guo-feng, ZHANG Zhi-yong, YAN Shao-hua, et al. Purification effects of large-area planting water hyacinth on water environment of Zhushan Bay, Lake Taihu[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(5):1299-1305.
- [19] 魏复盛.水和废水监测分析方法[M].四版.北京:中国环境科学出版社,2002.
WEI Fu-sheng. Monitoring analysis method of water and wastewater [M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [20] 刘国锋,范成新,钟继承,等.风浪作用下太湖改性沉积物对藻体絮

- 凝去除效果研究[J]. 环境科学, 2009, 30(1):52-57.
- LIU Guo-feng, FAN Cheng-xin, ZHONG Ji-cheng, et al. Research of algal-flocculation removal by modified sediment of Taihu Lake in wind action[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(1):52-57.
- [21] 陈宇炜, 陈开宁, 胡耀辉. 浮游植物叶绿素 a 测定的“热乙醇法”及其测定误差的探讨[J]. 湖泊科学, 2006, 18(5):550-552.
- CHEN Yu-wei, CHEN Kai-ning, HU Yao-hui. Discussion on possible error for phytoplankton chlorophyll-a concentration analysis using hot-ethanol extraction method[J]. *J Lake Sci*, 2006, 18(5):550-552.
- [22] Dinges R. Upgrading stabilization pond effluent by water hyacinth culture[J]. *Water Pollution Control Federation*, 1978, 50(5):833-845.
- [23] Wolverton B C, McDonald R C. The water hyacinth: From prolific pest to potential provider[J]. *Ambio*, 1979, 8(1):2-9.
- [24] 黄钰铃, 纪道斌, 陈明曦, 等. 水体 pH 值对蓝藻水华生消的影响[J]. 人民长江, 2008, 39(2):63-65.
- HUANG Yu-ling, JI Dao-bin, CHEN Ming-xi, et al. Water pH effects on algae bloom away[J]. *Yangtze River*, 2008, 39(2):63-65.
- [25] 陶益, 孔繁翔, 曹焕生, 等. 太湖底泥水华蓝藻复苏的模拟[J]. 湖泊科学, 2005, 17(3):231-236.
- TAO Yi, KONG Fan-xiang, CAO Huan-sheng, et al. Simulative recruitment of *Microcystis* from the surface sediment in Taihu Lake[J]. *J Lake Sci*, 2005, 17(3):231-236.
- [26] Anderson D M, Aubrey D G, Tyler M A, et al. Vertical and horizontal distributions of dinoflagellate cysts in sediments[J]. *Limnology and Oceanography*, 1982, 27(4):757-765.
- [27] You B S, Zhong J C, Fan C X, et al. Effects of hydrodynamics processes on phosphorus fluxes from sediment in large, shallow Taihu Lake[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19(9):1055-1060.
- [28] 朱广伟, 秦伯强, 高光. 强弱风浪扰动下太湖的营养盐垂向分布特征[J]. 水科学进展, 2004, 15(6):775-780.
- ZHU Guang-wei, QIN Bo-qiang, GAO Guang. Vertical distribution of the concentration of phosphorus and suspended solid in Taihu Lake affected by wind-induced wave[J]. *Advances in Water Science*, 2004, 15(6):775-780.
- [29] 孔繁翔, 高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. 生态学报, 2005, 25(3):589-595.
- KONG Fan-xiang, GAO Guang. Hypothesis on cyanobacteria bloom-forming mechanism in large shallow eutrophic lakes[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3):589-595.
- [30] 周庆, 韩士群, 严少华, 等. 富营养化湖泊规模化种养的水葫芦与浮游藻类的相互影响[J]. 水生生物学报, 2012, 36(4):783-791.
- ZHOU Qing, HAN Shi-qun, YAN Shao-hua, et al. The mutual effect between phytoplankton and water hyacinth planted on a large scale in the eutrophic lake[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2012, 36(4):783-791.
- [31] Sharma A, Gupta M K, Singhal P K. Toxic effects of leachate of water hyacinth decay on the growth of *Scenedesmus Obliquus* (Chlorophyta) [J]. *Water Research*, 1996, 30(10):2281-2286.
- [32] Kim Y, Kim W J. Roles of water hyacinths and their roots for reducing algal concentration in the effluent from waste stabilization ponds[J]. *Water Research*, 2000, 34(13):3285-3294.
- [33] Gu B H, Alexander V. Dissolved nitrogen uptake by a cyanobacterial bloom (*Anabaena flos-aquae*) in a Subarctic Lake[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1993, 59(2):422-430.
- [34] 盛婧, 郑建初, 陈留根, 等. 基于富营养化水体修复的风眼莲放养及采收条件研究[J]. 植物资源与环境学报, 2011, 20(2):73-78.
- SHENG Jing, ZHENG Jian-chu, CHEN Liu-gen, et al. Study on planting and harvest conditions of *Eichhornia crassipes* for eutrophic water remediation[J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2011, 20(2):73-78.
- [35] Yi Q T, Kim Y, Tateda M. Evaluation of nitrogen reduction in water hyacinth ponds integrated with waste stabilization ponds[J]. *Desalination*, 2009, 249:528-534.
- [36] Hadad H R, Maine M A. Phosphorous amount in floating and rooted macrophytes growing in wetlands from the Middle Paran'a River flood-plain (Argentina) [J]. *Ecological Engineering*, 2007, 31:251-258.
- [37] 张志勇, 郑建初, 刘海琴, 等. 风眼莲对不同程度富营养化水体氮磷的去除贡献研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1):152-157.
- ZHANG Zhi-yong, ZHENG Jian-chu, LIU Hai-qin, et al. Role of *Eichhornia crassipes* uptake in the removal of nitrogen and phosphorus from eutrophic waters[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(1):152-157.
- [38] 郑建初, 常志州, 陈留根, 等. 水葫芦治理太湖流域水体氮磷污染的可行性研究[J]. 江苏农业科学, 2008(3):247-250.
- ZHENG Jian-chu, CHANG Zhi-zhou, CHEN Liu-gen, et al. The feasibility research of controlling water nitrogen and phosphorus pollution by using water hyacinth in Taihu Lake basin[J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2008(3):247-250.
- [39] 黄漪平. 太湖水环境及其污染控制[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- HUANG Yi-ping. Water environment and pollution control in Taihu Lake[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [40] Chen K N, Bao C H, Zhou W P. Ecological restoration in eutrophic Lake Wuli: A large enclosure experiment[J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35:1646-1655.
- [41] 秦伯强, 胡维平, 刘正文, 等. 太湖水源地水质净化的生态工程试验研究[J]. 环境科学学报, 2007, 27(1):5-12.
- QIN Bo-qiang, HU Wei-ping, LIU Zheng-wen, et al. Ecological engineering experiment on water purification in drinking water source in Meiliang Bay, Lake Taihu[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(1):5-12.
- [42] 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[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(6):673-676.
- TONG Chang-hua, YANG Xiao-e, PU Pei-min. Effects and mechanism of hydrophytes on control of release of nutrient salts in Lake sediment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(6):673-676.
- [43] 章冬琴. 水葫芦 vs 水污染: 以毒攻毒还是以毒易毒? [N]. 南方周末, 2007-09-06.
- ZHANG Dong-qin. Water hyacinth vs water pollution: Combat poison with poison or take poison with another poison? [N]. Southern Weekend, 2007-09-06.
- [44] Villamagna A M, Murphy B R. Ecological and socio-economic impacts of invasive water hyacinth (*Eichhornia crassipes*): A review[J]. *Freshwater Biology*, 2009, 55(2):1-18.
- [45] 刘国锋, 刘海琴, 张志勇, 等. 大水面放养风眼莲对底栖动物群落结构及其生物量的影响[J]. 环境科学, 2010, 31(12):2925-2931.
- LIU Guo-feng, LIU Hai-qin, ZHANG Zhi-yong, et al. Effects of large-area planting water hyacinth on macro-benthos community structure and biomass[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(12):2925-2931.
- [46] Chen H G, Peng F, Liu G F, et al. Effects of engineered use of water hyacinths (*Eichhornia crassipes*) on the zooplankton community in Lake Taihu, China[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 38:125-129.