

大水面放养水葫芦对太湖竺山湖水环境净化效果的影响

刘国锋¹, 张志勇¹, 严少华^{1*}, 张迎颖¹, 刘海琴¹, 范成新²

(1. 江苏省农业科学院资源与环境研究所, 南京 210014; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

摘要:利用水葫芦等生长快、生物量高的漂浮植物来净化污染水体,已成为目前水体生态修复的一种快捷有效的方法.在太湖竺山湖放养水葫芦后对水体营养盐吸收和水质净化效果的影响进行了研究.结果表明,受风浪扰动等影响,水体交换强烈,水葫芦放养区内溶解氧含量变化幅度在 3.50~11.20 mg/L 之间,未出现厌氧现象.水葫芦须根具有较强的吸附悬浮物和拦截蓝藻细胞的能力,使得水葫芦放养区内 TN、TP 含量较高,其变化幅度分别为 3.37~8.02 mg/L、0.15~0.36 mg/L,高于放养区外围水体中 TN、TP 含量(其变化幅度分别为 3.03~7.45 mg/L 和 0.15~0.38 mg/L);较高含量的 TN、TP 浓度也表明水体处于重度污染.放养区内叶绿素最高值出现在 8 月,其含量为 177.01 mg/m³,同期边缘和外围处含量分别为 101.53 mg/m³ 和 76.96 mg/m³.随后因藻细胞代谢衰亡,其含量开始下降;较高含量叶绿素表明水葫芦根须对蓝藻细胞具有较强的吸附和拦截作用,表明水葫芦对水体具有较强的净化功能,为利用水葫芦对较大面积富营养化水体的净化提供了依据.

关键词:水葫芦放养;水环境;氮磷营养盐;吸附;净化效果

中图分类号:X173 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2011)05-1299-07

Purification Effects of Large-Area Planting Water Hyacinth on Water Environment of Zhushan Bay, Lake Taihu

LIU Guo-feng¹, ZHANG Zhi-yong¹, YAN Shao-hua¹, ZHANG Ying-ying¹, LIU Hai-qin¹, FAN Cheng-xin²

(1. Institute of Agricultural Resource and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Science, Nanjing 210014, China; 2. State Key Laboratory of Lake & Environment, Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Using water hyacinth and other fast-growing and high biomass of floating plants to purify polluted water has become an efficient and effective ecological restoration method at present. Effects of nutrients adsorption and water purification of planting water hyacinth on water quality in Zhushan Bay were studied. The results indicated that no anoxia was observed in water hyacinth planting areas because of wave disturbance and strong water exchange. Concentrations of TN and TP in water hyacinth planting areas were higher than that in the outside of stocking area (the content ranged 3.03~7.45 mg/L and 0.15~0.38 mg/L, respectively), and the content changes ranged 3.37~8.02 mg/L and 0.15~0.36 mg/L, respectively. The higher concentration of TN and TP in water indicated the water body was heavily polluted. Water hyacinth roots have a strong ability to adsorb suspended solids and algae cells, the concentration of Chl-a in stocking areas was higher than that in stocking fringe and outside, the maximum Chlorophyll in the stocking region in August was 177.01 mg/m³, and at the same time the concentrations in planting fringe and outside were 101.53 mg/m³ and 76.96 mg/m³, respectively. Higher Chl-a content on water hyacinth roots indicated that water hyacinth had strong blocking effects on algae cells, and demonstrated it had a great purification effects on eutrophicated water, and it also provides a basis for the larger polluted water bodies purification in using water hyacinth.

Key words: water hyacinth planting; water environment; N and P nutrients; adsorption; purification effect

近年来因太湖水体富营养化而产生的大量蓝藻暴发及由蓝藻聚集死亡引起的藻源性黑水团等水污染事件^[1-3],使得其对水质污染产生了质的变化,如何快速、有效地修复污染水体,已经成为当前水环境保护的迫切需求.针对这种情况,目前已采取了多种治理方式,如底泥疏浚^[4-9]、引江济太工程^[10,11]、种植水生植物修复水体^[12,13]等,在一定范围内取得了相应的效果.然而,针对太湖水体、特别是在北部如

梅梁湾、竺山湾等水体污染较重、水体流动性较差、污染物去除较为缓慢的湖湾中,迫切需要一种更为快捷有效的修复受损水体、原位恢复水体生态功能

收稿日期:2010-05-06;修订日期:2010-08-05

基金项目:国家科技支撑计划项目(2009BAC63B01);云南省社会发展专项(2009CA034)

作者简介:刘国锋(1979~),男,博士,主要研究方向为湖泊水环境污染及生态治理, E-mail: njliugf@yahoo.cn

* 通讯联系人, E-mail: shyan@jaas.ac.cn

的生态治理方法. 虽然有研究者认为富营养化水体的修复应该把重点放在集中控磷上, 而氮的循环较为复杂, 可以放宽对其限制^[14, 15]. 但如果能够在吸收水体中磷的同时也能够有效地去除氮, 将会对富营养化水体的修复起到事半功倍的功效. 因此如何快速有效地直接从水体中去除 N、P 营养盐, 成为当前科学工作者和环保人士的关注重点之一.

作为入侵物种之一, 凤眼莲 (*Eichhornia crassipes* Solms) 是世界十大恶性杂草之一, 曾一度被视为毒草^[16], 后来发现凤眼莲具有生长和扩繁能力快、适应性强, 且能够快速、高效地从水体中吸收氮磷营养盐并能够对多种重金属具有较强的吸收、转运能力, 利用凤眼莲的这一优点, 国内外的诸多学者开展了相应的研究^[17-20]. 目前利用水葫芦修复污染水体或对重金属的吸收等的研究多是在实验室或池塘等较小水体内进行^[21, 22]. 受水体面积、污染物的成分等的影响, 这些研究成果与在像太湖这样的大水面放养水葫芦后的实际情况会有一些的区别, 比如水体交换与否、风浪有无扰动、实验水体深度与实际水深以及污染物的浓度和成分区别等^[23-25]. 太湖作为长江中下游地区的大型浅水湖泊, 风浪扰动频繁, 不同湖区水体污染程度不同^[26, 27], 因此在开阔水域放养水葫芦后对水体中营养盐的吸收、水质净化、蓝藻的拦截等都有不同程度的影响^[28, 29]. 目前利用大水面控制性放养水葫芦来修复污染水体的研究尚鲜见到报道, 在这种开阔水域中放养水葫芦后对水体中营养盐的吸收、特别是对悬浮物及蓝藻细胞的吸附、拦截效果如何, 需要进行相关研究. 本研究以太湖竺山湖进行的计划放养 20 hm² 水葫芦的示范区为依托, 在控制性放养水葫芦期间对水葫芦放养区周围及放养区内部进行水质监控调查, 以期水葫芦修复水体的实际修复和水质净化效果提供理论依据.

1 样点布设及样品分析

1.1 采样点布设

研究地点设在太湖竺山湖的实验区 (N31°27'1" ~ 31°27'22", E120°4'00" ~ 120°4'40"), 本实验区靠近武进区太漏村, 该村有几十家酒店, 特别在夏季前来品尝水产品的人较多. 所设放养区东边为太漏村, 放养区周围有一航道 (图 1). 水葫芦放养区利用不锈钢管、围网和重力锚进行固定以防水葫芦随水漂流. 为了能够有效地监测水质变化, 共设样点 33 个, 其中远离放养区 12 个 (1 ~ 12 号点), 靠近放养区 12 个 (13 ~ 24 号点), 放养区内 9 个 (25 ~ 33 号

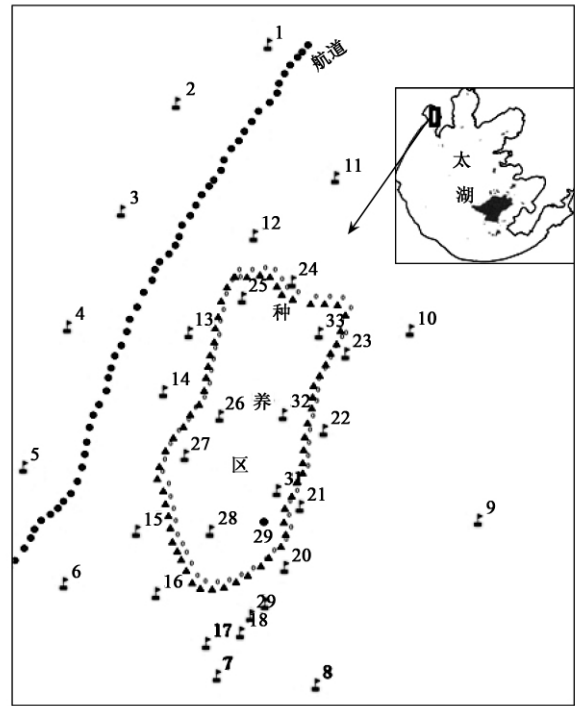


图 1 采样点位示意

Fig. 1 Sampling sites

点); 每个样点打桩后挂上写有编号的牌子, 并利用手持 GPS 定位.

1.2 样品采集及分析处理

水葫芦放养区从 7 月放满, 待水葫芦适应水体环境、长势较好后开始水样采集. 从 8 月开始至 11 月初水葫芦打捞完毕采样结束; 每月 5 日和 20 日左右进行水样采集, 采集水样时用采水器采集水体的上中下 3 层, 然后取其混合样. 同时测定水体的溶解氧 (dissolved oxygen, DO)、pH、透明度 (secchi disc depth, SD) 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. 水样的总氮 (total nitrogen, TN)、总磷 (total phosphorus, TP) 利用碱性过硫酸钾消煮法测定^[30], 水溶性铵态氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、硝态氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、磷酸根 ($\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$) 的含量是将水样经 GF/C (0.45 μm , Whatman) 滤纸过滤后利用注射式流动分析仪测定^[31]. 数据处理利用 Excel 2003 和 Origin 8 处理.

2 结果与分析

2.1 上覆水 pH、DO 和透明度的变化

水体 pH、DO 和透明度的变化情况如图 2 所示 (第 1 次样品采集的数据丢失, 在图 2 中所显示的缺少 8 月 5 日的的数据). 水体 pH 值表现出初始较高, 进入 9 月后开始下降, 并基本维持在 7.0 上下浮动,

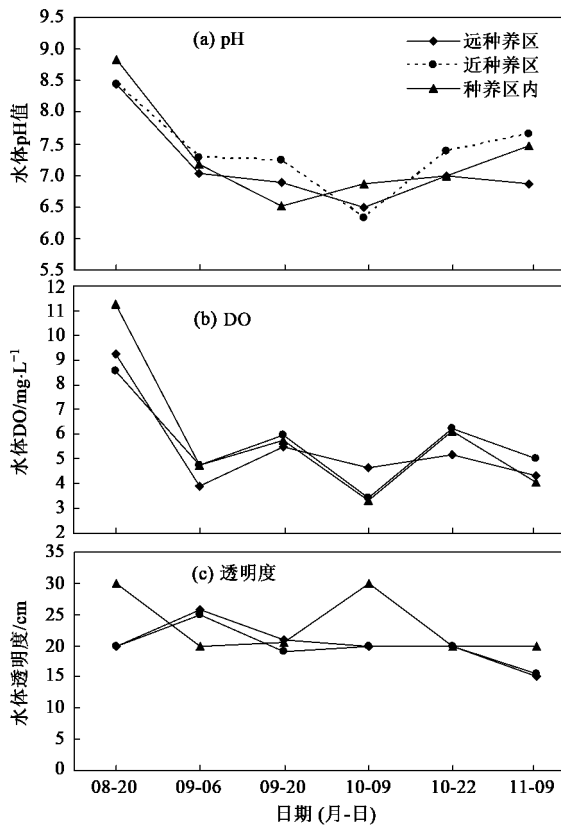


图2 上覆水中 pH、溶解氧和透明度变化

Fig. 2 Changes of pH, DO and SD in overlying water

且水葫芦放养区内部及边缘要稍高于放养区外围;而在8月的却偏高,这种变化可能是在9月前随温度升高,水体及底泥中大量蓝藻孢子复苏后开始上浮到水体表面的过程中,通过一系列生化反应调节水体的 pH 值在 8 左右,使得其有利于藻细胞的生长;水葫芦的生长会改变水体的 pH 值,因水葫芦的快速生长不消耗 CO_2 ,且会向水体中释放 CO_2 ;另外,水葫芦吸收了水体中大量的铵态氮和水体中厌氧微生物的厌氧发酵作用产生了大量的有机酸,使得水葫芦放养区水体的 pH 值开始下降,且水葫芦生长旺盛程度直接影响水体 pH 值的改变^[32-35],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^[36,37],较高的 pH 有利于藻细胞的生长,低 pH 则延缓藻细胞的生长。

水体溶解氧(DO)和透明度变化如图2(c)所示.溶解氧变化同 pH 变化类似,也是表现为在9月前较高,但进入9月后水体溶氧下降,基本维持在 3.30~6.20 mg/L 左右;水体透明度变化规律性较差,但仍然表现为水葫芦放养区内要高于放养区边缘和外围,透明度(secchi disk depth)基本在 20 cm

上下浮动.由于进入9月后水体中大量蓝藻细胞进入衰亡阶段,这些藻细胞的残体、水体中有机质的矿化和微生物的活性增强都会消耗水体中大量的溶解氧,使得 DO 含量表现为下降趋势;同时因水葫芦具有大量的须根系,在数千亩的水面上集中放养水葫芦,使得水葫芦放养区内水体流动性减弱^[38],可以有充裕时间来净化水质;同时在现场采样时发现,水葫芦大量的须根系也拦截了水体中的蓝藻细胞,这些蓝藻细胞衰亡后释放出的营养物质也为水葫芦生长提供了物质,降低了放养区外围水体的水质净化压力.受到航道行船和风浪扰动影响,引起水体沉积物再悬浮和藻细胞的漂移,水体透明度变化较大,规律性差;但水葫芦放养区内水体流动性低,且水葫芦大量须根具有较强的吸附悬浮物和蓝藻的作用,因此放养区内内部水体透明度要比放养区外围高。

2.2 上覆水 TN、TP 含量变化

从8~11月共进行了7次水样采集,其含量变化如图3所示,其中数据表示该采样时间下分析结果的平均值.从分析结果可以看出,上覆水体中 TN 含量呈现逐渐增加的趋势.8月所采集的样品中水样 TN 含量变化在 2.70~4.10 mg/L 之间,在靠近放养区和远离放养区内的 TN 含量在总体上表现为要低于放养区内 TN 含量,而且随采样时间变化,水葫芦放养区内外水体中 TN 含量都表现为增加趋势,这种变化在实验后期表现得更为明显,到11月实验结束时其含量为 7.45~8.15 mg/L 之间,水体中 TN 含量达到整个实验期间最高值,近放养区和放养区

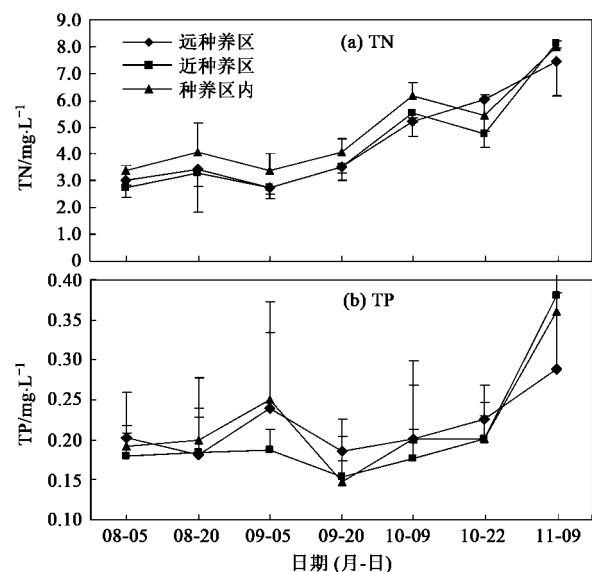


图3 上覆水中 TN、TP 含量变化

Fig. 3 TN and TP content changes in overlying water

内 TN 含量要高于放养区外围。

水体中 TP 含量变化也呈现类似的变化趋势,8 月采集的水样中 TP 含量变化为 0.18 ~ 0.21 mg/L,随着采样时间推进 TP 含量逐渐增加,但在 9 月的采样中表现稍有波动,在 9 月 20 日采样的样品中 TP 普遍下降,放养区内部、边缘和外部水体中 TP 含量分别为 0.15、0.15 和 0.19 mg/L;随后其含量逐渐增加,在实验结束时(11 月 9 日)放养区内部、边缘和外部水体中 TP 含量分别高达 0.36、0.38 和 0.29 mg/L,表现为放养区外围要低于近放养区和放养区内。

水体中 TN、TP 逐渐增加的这种变化可能原因一方面是由于随着温度升高、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^[39-42],并在 5 月之后常出现大量的蓝藻细胞堆积的现象;其次受风浪扰动后的沉积物再悬浮以及附近航道过往行船的影响,在沉积物出现再悬浮后造成沉积物中营养物质向上覆水体中释放,蓝藻细胞中也带有大量的氮磷营养盐^[43];另外,如前所述,在利用围隔固定后进行的控制性放养水葫芦时,水葫芦具有大量的须根系可以吸附、拦截水体中悬浮物和水体中的蓝藻细胞,在实际采样中发现水葫芦放养区内和水葫芦根须上黏附有大量的悬浮物和蓝藻细胞;再次是因为所设实验区靠近武进区太漏村,该村中有数十家酒店,夏季食客众多,且村中的生活污水未经处理而直接排放到湖水中,这些因素都增加了水体污染程度,使得所采集样品的 TN、TP 测定结果含量较高,特别是水葫芦放养区内部和边缘水体中 TN、TP 含量要明显高于放养区外围水体中的含量;水体中较高含量的 TN、TP 也表明该处水域中水质处于重富营养化状态。

2.3 水溶性 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、 PO_4^{3-} -P 含量变化

上覆水体中 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 NH_4^+ -N 含量在 8 月为 0.90 ~ 1.30 mg/L,9 ~ 11 月的含量为 0.36 ~ 0.95 mg/L,表现为初始采样测定值较高,随后下降,其总的变化幅度在 0.30 ~ 1.30 mg/L 之间;水溶性 NO_3^- -N 含量也有类似的变化趋势,在 8 月 5 日的含量变化范围在 0.70 ~ 4.10 mg/L 之间,但在 8 月 20 日和 9 月 5 日之间出现一个快速下降过程,其含量变化范围在 0.50 ~ 0.90 mg/L 之间,随后其含量开始上升,至实验结束时放养区外围含量最高达 4.08 mg/L;但在 10 月 22 日所采集的样品中,其含量出现一个较低值,最低值仅为 0.52 mg/L。 PO_4^{3-} -P

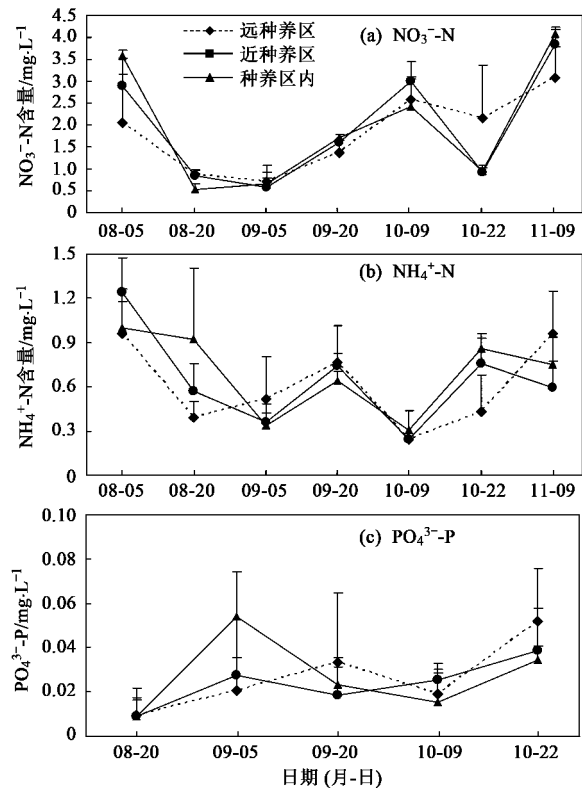


图 4 上覆水中 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、 PO_4^{3-} -P 含量

Fig. 4 NO_3^- -N, NH_4^+ -N, PO_4^{3-} -P content changes in overlying water

含量变化差异较大,除了 9 月 5 日表现为放养区内含量较高外,其他采样期间表现为要低于放养区边缘和外围,9 月 5 日后 PO_4^{3-} -P 浓度变化范围在 0.009 ~ 0.034 mg/L。

从空间变化上来看,在水葫芦放养区内部和边缘水体中 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 含量要高于放养区外围,但规律性较差。在初始采样时期(8 月), NH_4^+ -N 含量表现为水葫芦放养区内部要高于放养区外部;在 9 月反而出现放养区内部其含量低于放养区边缘和外部,到了 10 月 22 日表现为放养区内部含量最高。但上覆水体中 NH_4^+ -N 含量普遍较低,最高也仅为 1.34 mg/L。 NO_3^- -N 含量的变化趋势更为明显,在 8 月 5 日采集的样品中其含量较高,水葫芦放养区内部含量为 3.60 mg/L,要高于边缘和外部;随后出现一个快速下降阶段,到了 8 月 20 日后,其最高含量仅为 0.87 mg/L,放养区内部仅为 0.52 mg/L。进入 10 月后,水体中 NO_3^- -N 含量开始增加,但放养区内部的含量与放养区边缘和外部的含量变化规律性不明显。 PO_4^{3-} -P 含量变化规律性较差,但在 10 月后也出现增加趋势,表现出水葫芦放养区内部要低于放养区边缘和外围水体,这可能是因在进入 9 月后,水

葫芦生长旺盛期,对水溶性 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 吸收较快,而外围水体受风浪、行船扰动后底泥释放、藻细胞的代谢等释放出水溶性的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 而使得其含量要略高于放养区内部.由于 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度缺少 2 次调查数据,其总体的变化趋势不明显.

蓝藻细胞属于固氮菌,可以从空气中和水体获得其所需营养物质,特别是水溶性营养盐(如 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)更易于为生物利用.有研究发现在适宜的温度、光照条件下藻细胞可以比其他生物能够更有效地利用这些营养盐^[44];同时较高的 P 含量和较低 TN/TP,更有利于蓝藻细胞形成藻华.但在像太湖竺山湖等严重富营养化的水体中, TN、TP 含量及比值已经远高于藻细胞生长的临界阈值,也即不能对蓝藻细胞的生长产生限制作用,只是在不同温度、水文等气象条件影响下,蓝藻水华暴发的严重程度问题.因此在竺山湖放养数千亩水面的水葫芦后,蓝藻细胞进入水葫芦放养区后就会被拦截、吸附到水葫芦的须根处;同时因风浪和行船扰动作用,水葫芦放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其对水质净化效果表现不明显,但可以看出水葫芦须根对悬浮物质和蓝藻细胞的吸附和滞留,从而减少了放养区外围水体中这些物质的含量,减轻了外部水体水质恶化压力.根据 Yi 等^[28]研究发现,水葫芦根须引起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藻的分离和反硝化作用去除氮起到了关键作用.根据本研究的调查结果表明(图 2),水葫芦放养区内外水体中溶解氧差异不明显,也即此种条件下不会因放养水葫芦而对水体环境产生不利作用. Hadad 等^[45]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,且有较强的分蘖能力,使得它能够比其他水生植物在短期内能够积累更多的 N、P 等营养盐,可以从水体中带走更多的营养盐,从而实现污染水体的生态治理,因此漂浮植物常用作污染水体修复的优选植物^[17,46-48].

2.4 水体中叶绿素含量变化

试验期间水体中藻细胞的含量变化用叶绿素来表示,其变化趋势如图 5 所示(8 月 5 日和 11 月 9 日 2 次样品的叶绿素数据损坏,在图中没有显示).从叶绿素变化情况可以看出,水葫芦放养区外围、边缘和内部的含量差异较大,在 8 月 20 日的样品中放养区内部叶绿素含量高达 177.01 mg/m^3 ,同期边缘和外围处叶绿素含量分别为 101.53 mg/m^3 和 76.96

mg/m^3 ,表现出放养区内部 > 放养区边缘 > 放养区外围的变化趋势;到了 9 月 5 日,水葫芦放养区各个部分的叶绿素含量略有下降,仍然呈现出类似的变化趋势.到了 9 月中下旬后,可能受藻细胞的代谢作用和水温等影响,藻细胞开始大量衰亡,表现为叶绿素含量快速下降,放养区内、边缘和外部其含量分别为 24.80 、 19.41 和 17.79 mg/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,因此表现为叶绿素含量较低.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大大降低;同时水葫芦根系及茎叶等可能会分泌化感物质^[49,50],抑制蓝藻细胞生长,从而实现了对污染水体的净化功能.

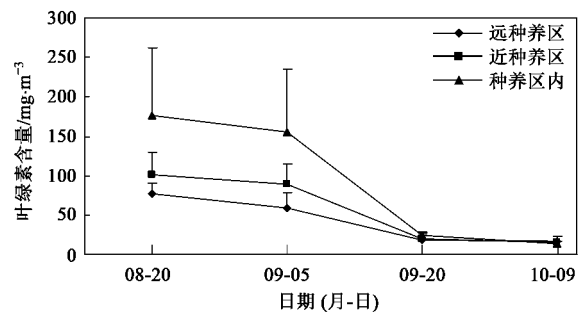


图 5 上覆水中叶绿素含量变化

Fig. 5 Chl-a content changes in overlying water

太湖每年 5 月后都会出现大量蓝藻,如在合适的气象因子影响下会出现大量聚集甚至产生藻源性黑水团现象^[1-3],对当地的生产、生活造成极大的影响.放养水葫芦后,放养区内外蓝藻细胞的分布情况产生了较大的变化.虽然目前仍有较多研究者对利用水葫芦修复污染水体持不同看法,特别是对其在水体修复和治理中的作用仍有争议^[16,20,51].但根据笔者在太湖竺山湖中所进行的控制性放养水葫芦的调查结果表明,在解决了前期的控制性放养这一防止其可能漂移而造成其泛滥的问题及后续资源化利用的处理问题后,在像太湖这样大型浅水湖泊中,受风浪扰动和沉积物再悬浮较为强烈的水体中,放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,比如底栖生物多样性降低、水体缺氧、水质恶化等现象^[52].这可能是因为水葫芦放养面积较小,与竺山湖的水面相比小得多,而且受附近航道行船及夏秋季节强烈的风浪扰动等的影响,使得水体交换和流动性增强,从而弱化了水葫芦大水面覆盖

后对水体环境的不利影响。同时,开阔的水面和充足的营养物质,为水葫芦的扩繁和快速生长提供了所需的光照、温度、溶氧及 C、N、P 营养盐,水葫芦能够直接从水体中摄取所需物质,在后期对其进行收割、打捞和资源化利用后,实现了水体原位生态修复和污染物的直接去除的目的。由于利用大水面放养水葫芦仍是一个全新的课题,期间有许多以前没有遇到的问题,如何增加其对水体的净化效果和发挥其最佳净化功能,仍需要做进一步的深入研究。

3 结论

(1) 受附近航道行船、风浪扰动及水体交换强烈等的影响,水葫芦放养区内溶解氧含量变化幅度在 3.50 ~ 11.20 mg/L 之间,没有出现水体厌氧现象。

(2) 因水葫芦根须对悬浮物和蓝藻等的吸附拦截作用,水葫芦放养区内 TN、TP 含量变化幅度分别为 3.37 ~ 8.02 mg/L 和 0.15 ~ 0.36 mg/L; 放养区外围分别为 3.03 ~ 7.45 mg/L 和 0.15 ~ 0.38 mg/L,明显低于放养区内部的 TN、TP 含量变化幅度。水葫芦的须根拦截的大量蓝藻细胞,减轻了外部水体中蓝藻聚集的压力; 并且这些藻细胞衰亡后释放出来的营养物质为水葫芦的生长提供了所需物质。

(3) 水葫芦须根对悬浮物和蓝藻细胞具有较强的吸附、持留作用,使得水葫芦放养区内藻细胞叶绿素含量变化幅度在 13.25 ~ 177.01 mg/m³, 远离放养区的叶绿素变化幅度在 16.74 ~ 76.96 mg/m³, 近放养区的叶绿素变化幅度在 14.42 ~ 101.53 mg/m³, 表明放养区内部水葫芦根须拦截了大量蓝藻细胞。

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.
- [2] Lucie G. Doing battle with the green monster of Taihu Lake[J]. Science,2007,317: 1166.
- [3] Yang M, Yu J W, Li Z L, et al. Taihu Lake not to blame for Wuxi's woes[J]. Science,2008,319(5860): 158.
- [4] 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.
- [5] 钟继承. 湖泊底泥疏浚新生表层氮磷循环与内源控制[D]. 北京: 中国科学院研究生院,2007.
- [6] 吴芝瑛,虞左明,盛海燕,等. 杭州西湖底泥疏浚工程的生态效应[J]. 湖泊科学,2008,20(3): 277-284.
- [7] 钟继承,刘国锋,范成新,等. 湖泊底泥疏浚环境效应: III. 对沉积物反硝化作用的影响[J]. 湖泊科学,2009,21(4): 465-473.
- [8] 钟继承,刘国锋,范成新,等. 湖泊底泥疏浚环境效应: I. 内源磷释放控制作用[J]. 湖泊科学,2009,21(1): 84-93.
- [9] 刘爱菊,孔繁翔,史小丽,等. 底泥疏浚对湖泊沉积物的生态毒性效应的影响[J]. 中国环境科学,2006,26(5): 565-569.
- [10] 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.
- [11] 贾锁宝,尤迎华,王嵘. 引江济太对不同水域氮磷浓度的影响[J]. 水资源保护,2008,24(3): 53-56.
- [12] 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.
- [13] 俞海桥,方涛,夏世斌,等. 不同生态修复措施下太湖西五里湖沉积物氮磷形态的时空分布[J]. 湖泊科学,2007,19(6): 683-689.
- [14] 王海军,王洪铸. 富营养化治理应放宽控氮、集中控磷[J]. 自然科学进展,2009,19(6): 599-604.
- [15] Schelske C L. Eutrophication: focus on phosphorus[J]. Science,2009,324: 722.
- [16] 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.
- [17] 张文明,王晓燕. 水葫芦在水生态修复中的研究进展[J]. 江苏环境科技,2007,20(1): 55-58.
- [18] 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.
- [19] 乐意全,郑师章,周纪伦. 凤眼莲-根际微生物系统的降酚效应[J]. 植物生态学与地植物学学报,1990,14(2): 151-159.
- [20] Malik A. Environmental challenge vis a vis opportunity: The case of water hyacinth[J]. Environment International,2007,33: 122-138.
- [21] 葛绪广,王国祥,李振国,等. 凤眼莲凋落物及其残体的沉降[J]. 湖泊科学,2009,21(5): 682-686.
- [22] 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.
- [23] 李泽唐,蔡鹤生,马腾,等. 水葫芦气囊预处理黄姜皂素废水的实验研究[J]. 环境科学,2006,27(7): 1369-1372.
- [24] Zimmels Y, Kirzhner F, Kadmon A. Effect of circulation and aeration on wastewater treatment by floating aquatic plants[J]. Separation and Purification Technology,2009,66: 570-577.
- [25] 韩红娟,翟水晶,胡维平. 马来眼子菜腐烂分解氮磷转化模型研究[J]. 环境科学,2010,31(6): 1483-1488.
- [26] 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.
- [27] 张路,范成新,池俏俏,等. 太湖及其主要入湖河流沉积磷形态分布研究[J]. 地球科学,2004,33(4): 423-432.
- [28] 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.

- [29] 朱红钧. 凤眼莲生态型河道水流特性试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [30] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [31] 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.
- [32] Dinges R. Upgrading stabilization pond effluent by water hyacinth culture[J]. Water Pollution Control Federation, 1978, 50(5): 833-845.
- [33] 吴振斌, 丘昌强. 石化废水盐分对凤眼莲生长及净化效率的影响[J]. 水生生物学报, 1990, 14(3): 239-246.
- [34] Wolverton B C, McDonald R C. The water hyacinth: from prolific pest to potential provider [J]. AMBIO, 1979, 8(1): 2-9.
- [35] 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.
- [36] 吴剑, 孔倩, 杨柳燕, 等. 铜绿微囊藻生长对培养液日值和氮转化的影响[J]. 湖泊科学, 2009, 21(1): 123-127.
- [37] 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.
- [38] 袁梦, 黄本胜, 邱秀云, 等. 水葫芦覆盖区水流阻力效应试验研究[J]. 广东水利水电, 2008, 2: 7-10.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 吴生才, 陈伟民, 高光. 太湖冬季底泥中活体藻类的检测[J]. 湖泊科学, 2003, 15(4): 339-344.
- [42] Fallon R D, Thomas D B. Overwintering of *Microcystis* in Lake Mendota [J]. Freshwater Biology, 1981, 11(3): 217-226.
- [43] 孙小静, 秦伯强, 朱广伟. 蓝藻死亡分解过程中胶体态磷、氮、有机碳的释放[J]. 中国环境科学, 2007, 27(3): 341-345.
- [44] Gu B H, Alexander V. Dissolved nitrogen uptake by a cyanobacterial bloom (*Anabaena flosaquae*) in a subarctic lake [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1993, 59(2): 422-430.
- [45] Hadad H R, Maine M A. Phosphorous amount in floating and rooted macrophytes growing in wetlands from the Middle Parana River floodplain (Argentina) [J]. Ecological engineering, 2007, 31: 251-258.
- [46] Aoi T, Hayashi T. Nutrient removal by water lettuce (*Pistia stratiotes*) [J]. Water Science and Technology, 1996, 34(7-8): 407-412.
- [47] 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.
- [48] Sooknah R D, Wilkie A C. Nutrient removal by floating aquatic macrophytes cultured in anaerobically digested flushed dairy manure wastewater [J]. Ecological Engineering, 2004, 22: 27-42.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] 章冬琴. 水葫芦 VS 水污染: 以毒攻毒还是以毒易毒? [EB/OL]. 南方周末, <http://www.infzm.com/content/305>, 2007.
- [52] 刘国锋, 刘海琴, 张志勇, 等. 大水面放养凤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.