

印度小竹节草的生物修复潜力研究

姜妮妮^{1,2}, 毛玉泽³, 房景辉³, 杜美荣³, 隋海东³, 李敏³, 方建光^{3*}

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 农业部海洋渔业可持续发展重点实验室, 山东 青岛 266071)

摘要: 为探究印度小竹节草的生物修复潜力, 采用实验生态学方法研究了印度小竹节草对铜绿微囊藻的抑制作用和富营养化水体氮磷的去除效果。实验通过分别设置4个栽培密度(1、2、3和4 g/L), 3个营养盐梯度(中营养、富营养和极富营养), 跟踪检测了培养液中硝氮($\text{NO}_3\text{-N}$)、亚硝氮($\text{NO}_2\text{-N}$)、氨氮($\text{NH}_4\text{-N}$)、总氮(TN)和总磷(TP)的浓度变化; 并对印度小竹节草与铜绿微囊藻共培养下铜绿微囊藻的生长状况及营养盐的衰减状况进行了初步研究。结果表明, 印度小竹节草具有很强的营养盐去除能力, 栽培密度为4 g/L时, TN和TP去除率最高, 分别为99.50%和93.45%, 各处理组间的TN和TP去除率差异性不显著。营养程度对印度小竹节草N、P吸收速率具有极显著性影响, N、P吸收速率随着各组N、P浓度的升高而增加, 极富营养处理组TN和TP吸收速率达到最高, 分别为1.11和0.15 $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{h})$ 。同时, 极富营养处理组TN和TP去除率也显著高于其他处理组, 分别高达99.46%和90.75%。共培养实验表明, 印度小竹节草对铜绿微囊藻具有较好的抑制效果, 抑藻率高达99.89%。实验组TP浓度后期大幅度下降, 与对照组存在极显著差异, 且 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度极显著低于对照组。综合以上实验结果, 印度小竹节草可考虑作为生态修复物种在富营养化水体进行种植, 同时在铜绿微囊藻水华预防方面也具有一定的应用潜力。

关键词: 印度小竹节草; 氮磷; 去除率; 吸收速率; 铜绿微囊藻; 抑藻率

中图分类号: S 917.3, X 171.4

文献标志码: A

水体富营养化是指在人类活动的影响下, 氮、磷等营养物质大量进入湖泊、海湾等缓流水体, 引起藻类及其他浮游生物迅速繁殖, 水体溶解氧量下降, 水质恶化的现象^[1]。水体富营养化问题是当前我国湖泊面临的主要生态环境问题之一, 如何有效地降低富营养水体中氮磷含量、净化污染水体, 已成为当今亟需解决的生态问题^[2]。

水生植物体通过吸收营养物质可显著改善水环境系统, 是目前最为高效的生态修复手段。植物修复因其高效性、低耗性、无污染性等优点而成为国内外研究热点, Hu等^[3]和Lu等^[4]分别利用蕹菜(*Ipomoea aquatica* Forsskal)和大藻(*Pistia stratiotes* L.)对富营养化水体进行修复, 均取得

了较明显的净化效果; 杨旻等^[5]则利用菖蒲(*Acorus calamus* L.)对不同程度富营养化水体进行净化, 发现其不仅可以较好地净化富营养水体, 同时也能长时间保持水质的清洁。然而, 水葫芦(*Eichhornia crassipes*)和芦苇(*Phragmites australis*)等一些大型水生植物, 虽对富营养化水体具有较好的净化效果, 但由于其入侵性强, 反而会引发新的环境问题^[6]。因此, 筛选净化效果好、易于控制的水生植物是污水处理研究的主要方向。

水体中总氮、总磷含量居高不下, 直接导致蓝藻水华的发生, 其中以微囊藻水华最为严重。铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)是微囊藻水华

收稿日期: 2015-06-02 修回日期: 2015-07-04

资助项目: 国家自然科学基金委员会-山东省人民政府联合资助海洋科学研究中心项目(U1406403); 国家海洋局海洋公益性行业科研专项(201305043); 国家支撑计划课题(2011BAD13B02)

通信作者: 方建光, E-mail: fangjg@ysfri.ac.cn

的优势种,如何有效控制铜绿微囊藻已成为蓝藻水华治理的重要课题^[7]。关于水生植物抑制藻类生长而治理水体富营养化的研究,国内外已有较多相关报道^[8-9],但利用作为观赏植物的印度小竹节草(*Najas indica*)抑制铜绿微囊藻生长的报道至今尚不多见。

印度小竹节草作为景观植物,具有生长迅速、生命力顽强,易于控制等优点,可作为水生生态系统修复的潜在材料。本实验主要研究了不同营养程度水体和不同密度条件下印度小竹节草对氮磷营养元素的吸收状况,并针对印度小竹节草对铜绿微囊藻的抑制作用进行了初步研究,旨在为解决水体富营养化问题提供理论和实践依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

印度小竹节草采自室内培育品种,利用放置 1 d 的自来水为培养基,其中总氮(TN)0.74 mg/L,总磷(TP)0.02 mg/L,参照舒金华^[10]的富营养化评价标准,属于中营养水。室温和自然光照条件下培养,平均光照强度为 100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,温度为 24~26 $^{\circ}\text{C}$,预培养 7 d。

铜绿微囊藻购自中国科学院武汉水生生物研究所,采用 BG11 为培养基^[11],室温和自然光照条件下培养,平均光照强度为 100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,温度为 24~26 $^{\circ}\text{C}$,预培养 7~9 d。

1.2 不同密度印度小竹节草对富营养水体氮磷的吸收情况

实验前将印度小竹节草用蒸馏水清洗,吸水纸吸干表面水分并使用天平(精确到 0.01 g)称取湿重,密度分别设置为 0、1、2、3 和 4 g/L,每个处理 3 个平行。富营养水体为参照舒金华^[10]设置的 1 个富营养浓度(表 1)。实验开始后,每 2 d 取 1 次水样,分别测定硝氮($\text{NO}_3 - \text{N}$)、亚硝氮($\text{NO}_2 - \text{N}$)、氨氮($\text{NH}_4 - \text{N}$)、总氮(TN)和总磷(TP)含量,连续分析 9 d。绘制 $\text{NO}_3 - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2 - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4 - \text{N}$ 、TN 和 TP 剩余浓度与时间曲线,并计算 $\text{NO}_3 - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2 - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4 - \text{N}$ 、TN 和 TP 的去除率,去除率(C)计算公式^[12]:

$$C(\%) = \frac{(C_0 \cdot V_0 - C_i \cdot V_i) \times 100\%}{C_0 \cdot V_0}$$

式中:C 为去除率(%), C_0 为实验开始时培养液中营养盐浓度(mg/L), V_0 为实验开始时培养液

体积, C_i 为实验第 i 天培养液中营养盐浓度(mg/L), V_i 为实验第 i 天培养液的体积(L)。

表 1 富营养水体中各营养成分分配比浓度

指标 index	TP	TN	$\text{NH}_4 - \text{N}$	$\text{NO}_2 - \text{N}$	$\text{NO}_3 - \text{N}$
浓度/(mg/L) concentration	0.17	2.0	0.40	0.02	1.53

1.3 不同营养条件下印度小竹节草对氮磷的吸收情况

实验参照舒金华^[10]的评价参数设置 3 个营养盐浓度(表 2)。参考上述实验结果,将印度小竹节草的密度设置为处理效果较佳的 4 g/L,以不放印度小竹节草的烧杯为对照组,每个处理 3 个平行。实验开始后,每天称取印度小竹节草的鲜重,并分别测定 $\text{NO}_3 - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2 - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4 - \text{N}$ 、TN 和 TP 含量,连续分析 7 d。对 $\text{NO}_3 - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2 - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4 - \text{N}$ 、TN 和 TP 绘制剩余浓度与时间曲线,并计算其去除率(C)和吸收速率(U)。吸收速率(U)计算公式^[13]:

$$U[\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})] = \frac{(C_0 - C_t) \cdot V}{t \cdot G}$$

式中:U 为营养盐的吸收速率 [$\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$], C_0 为实验结束时对照组培养液中营养盐浓度(mg/L), C_t 为实验结束时实验组培养液中的营养盐浓度(mg/L),V 为所用培养液体积(L),t 为实验时间(h),G 为印度小竹节草的生物量(g)。

表 2 不同营养水体中各营养成分分配比浓度

	中营养 mesotrophic	富营养 eutrophic	极富营养 utmost eutrophic
TP	0.03	0.17	0.49
TN	0.30	1.84	3.37
$\text{NH}_4 - \text{N}$	0.02	0.45	1.36
$\text{NO}_2 - \text{N}$	0.01	0.02	0.02
$\text{NO}_3 - \text{N}$	0.26	1.37	1.85

1.4 印度小竹节草与铜绿微囊藻共培养的抑藻实验

将预培养的铜绿微囊藻液接种至 BG11 培养基中,使藻液初始浓度为 1.70×10^5 个/mL。印度小竹节草在放入前,用蒸馏水冲洗,吸水纸吸干后称其湿重,印度小竹节草的密度设置为 4 g/L,

每个处理 3 个平行,同时设 3 个空白对照组。每 2 d 测定铜绿微囊藻的数量、叶绿素 a、NO₃-N、NO₂-N、NH₄-N、TN 和 TP 含量,连续分析 11 d。对 NO₃-N、NO₂-N、NH₄-N、TN 和 TP 绘制剩余浓度与时间曲线,并根据藻细胞密度,计算印度小竹节草的抑藻率 (IR)。抑藻率计算公式^[14]:

$$IR (\%) = (M - N) / M \times 100\%$$

式中,IR 为铜绿微囊藻的抑制率 (%),M 为对照组藻细胞密度 (个/mL),N 为实验组藻细胞密度 (个/mL)。

1.5 测定方法

NO₃-N、NO₂-N、NH₄-N、TN 和 TP 含量的监测方法及参考标准见表 3。铜绿微囊藻生长量采用血球计数板显微计数法^[15],叶绿素 a 含量采用比色法^[16-17]测定。

表 3 各指标测定方法以及参照规范
Tab. 3 The measurement and standard reference of different indexes

监测指标 index	监测方法 measurement	参考标准 standard reference
NO ₃ -N	紫外分光光度法 ultraviolet spectrophotometry	HJ/T 346-2007
NO ₂ -N	分光光度法 spectrophotometric method	GB/T 7493-1987
NH ₄ -N	纳氏试剂分光光度法 Nessler's reagent spectrophotometry	HJ/535-2009
TN	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法 alkaline potassium persulfate digestion-UV spectrophotometric method	GB 11894-89
TP	钼酸铵分光光度法 ammonium molybdate spectrophotometric method	GB 11893-89

1.6 数据分析

使用 Excel 软件进行绘图分析,运用统计分析软件 SPSS16.0 对数据进行单因素方差分析,差异显著性水平为 $P < 0.05$,极显著水平为 $P < 0.01$ 。

2 结果

2.1 不同密度印度小竹节草对营养盐的吸收

到实验结束时,印度小竹节草的高栽培密度比低栽培密度的水体具有更低的 N、P 含量,且与对照组存在极显著差异 ($P < 0.01$,图 1)。

在一定范围内,印度小竹节草的 N、P 去除率随栽培密度的增加而增加,栽培密度为 4 g/L 时,NO₂-N 去除率达到最高,为 97.94% (图 2),与 1 g/L 低密度处理组存在极显著性差异 ($P < 0.01$)。TN 和 TP 去除率在栽培密度为 4 g/L 时也达到最高,分别为 99.50% 和 93.45%,而各处理组间的 TN 和 TP 去除率差异不显著 ($P > 0.05$)。

2.2 不同营养条件下印度小竹节草对营养盐的吸收

各处理组 N、P 含量均呈极显著性下降趋势

($P < 0.01$,图 3)。实验初期,印度小竹节草的 N、P 吸收速率较快,后期逐渐减慢。

选取实验前 48 h 对不同营养条件下印度小竹节草的 N、P 平均吸收速率进行比较,印度小竹节草的 N、P 吸收速率随着各组 N、P 浓度的升高而增加,最大吸收速率均发生在极富营养处理组 (图 4-a)。单因素方差分析表明,营养程度对印度小竹节草 N、P 吸收速率具有显著性影响 ($P < 0.05$)。TN 和 TP 吸收速率分别高达 1.11 和 0.15 $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$,极显著高于其他处理组 ($P < 0.01$)。

在一定范围内,印度小竹节草对培养液中 N、P 去除率随着营养水平的升高而增加 (图 4-b),极富营养条件下 TN 去除率 (99.46%) 和 TP 去除率 (90.75%) 达到最高,极显著高于其他处理组 ($P < 0.01$)。单因素方差分析表明,营养程度对印度小竹节草 NH₄-N、TP 去除率的影响极显著 ($P < 0.01$);极富营养处理组 TN 去除率与中营养和富营养处理组存在极显著差异 ($P < 0.01$),而各处理组间 NO₂-N 去除率的差异不显著 ($P > 0.05$)。

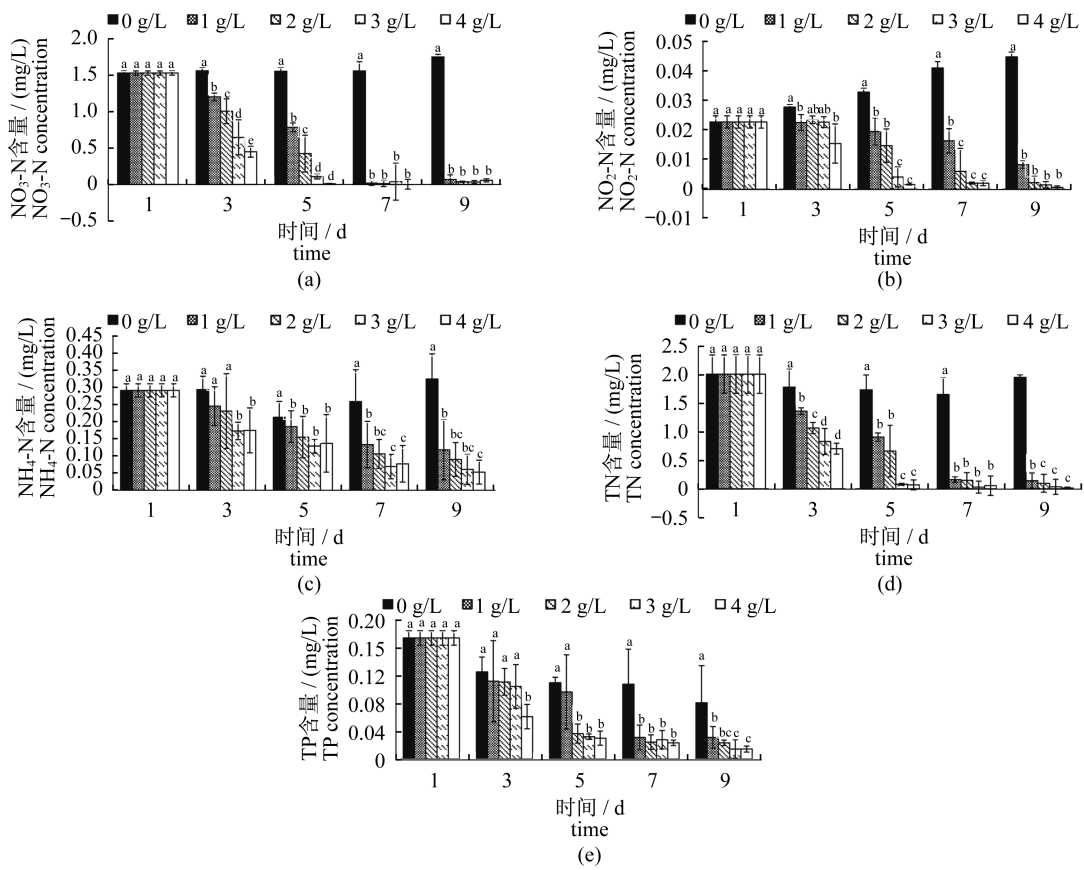


图 1 不同密度条件下 NO₃-N、NO₂-N、NH₄-N、TN 和 TP 浓度的变化

图中同一时间内标有不同字母的数据表示相互之间差异显著 ($P < 0.05$)

Fig. 1 The variations of NO₃-N, NO₂-N, NH₄-N, TN and TP concentrations at different planting densities

Data with different letters for the same time mean significant differences from each other ($P < 0.05$)

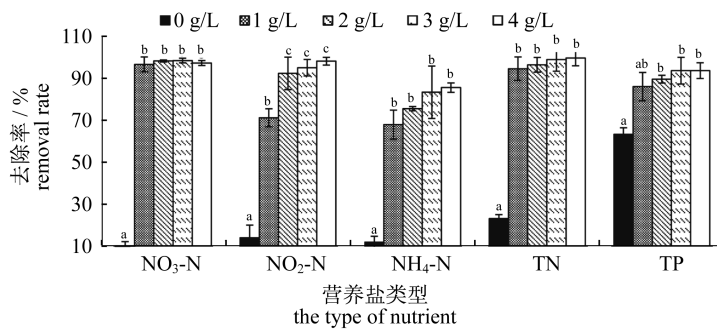


图 2 不同密度条件下 NO₃-N、NO₂-N、NH₄-N、TN 和 TP 的去除率变化

图中相同营养盐类型下标有不同字母的数据表示相互之间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

Fig. 2 The removal rates of NO₃-N, NO₂-N, NH₄-N, TN and TP at different planting densities

Data with different letters for the same type of nutrient mean significant differences from each other ($P < 0.05$), the same below

2.3 印度小竹节草对铜绿微囊藻生长的影响

铜绿微囊藻与印度小竹节草共培养 11 d 后, 共培养液水体透明, 而对照组呈浅绿色, 实验组和对照组存在极显著差异 ($P < 0.01$)。在印度小竹

节草与铜绿微囊藻共培养期间, 实验组铜绿微囊藻从第 2 天开始几乎处于生长停滞状态, 而对照组在第 3 天进入指数生长期, 到实验结束时, 藻细胞浓度则高达 9.22×10^6 个/mL (图 5-a)。藻体

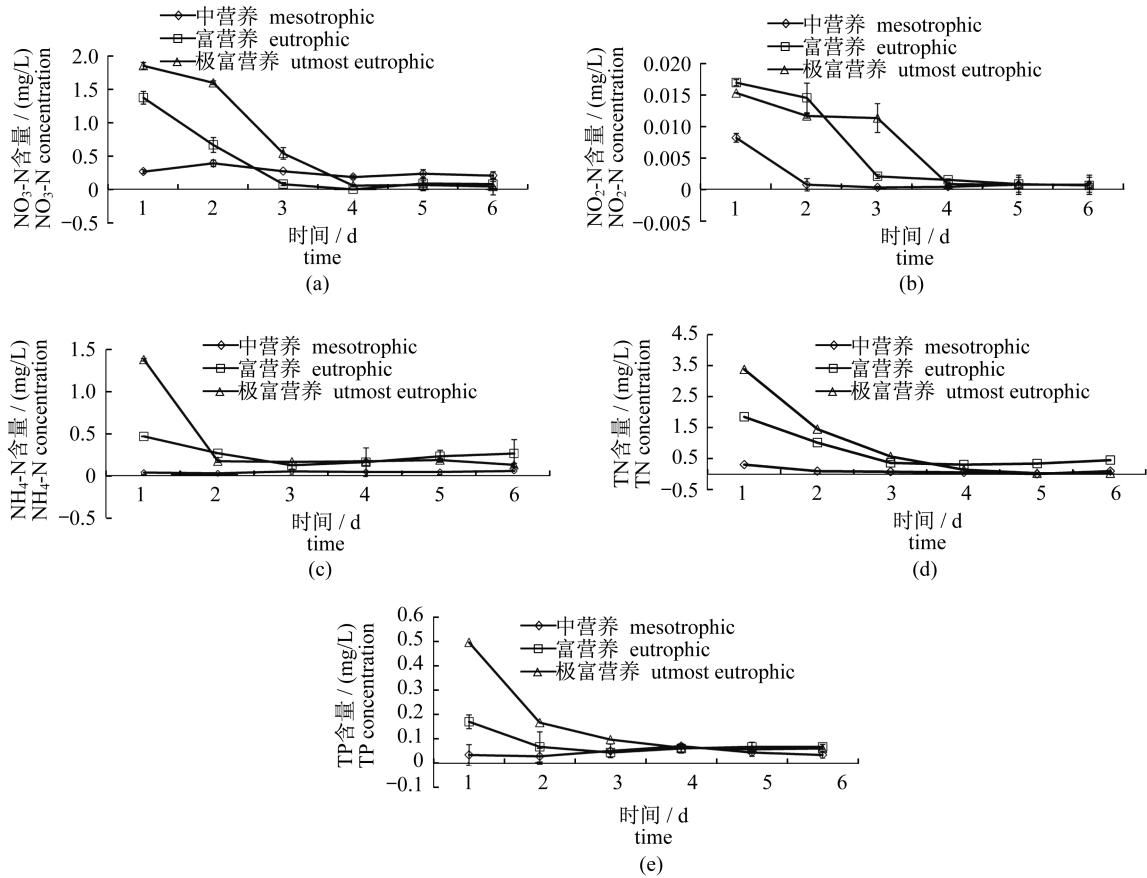


图 3 不同营养条件下 NO_3-N 、 NO_2-N 、 NH_4-N 、TN 和 TP 浓度的变化

Fig. 3 The variations of NO_3-N , NO_2-N , NH_4-N , TN and TP concentrations at different degrees eutrophic water

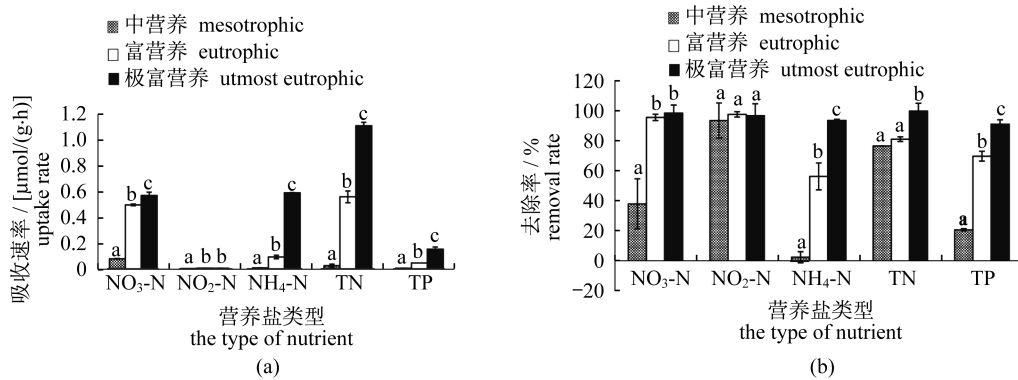


图 4 不同营养条件下 NO_3-N 、 NO_2-N 、 NH_4-N 、TN 和 TP 吸收速率和去除率的变化

Fig. 4 The uptake rates and removal rates of NO_3-N , NH_4-N , NO_2-N , TN and TP at different degrees eutrophic water

中的 Chl. a 含量往往与藻细胞的生长状态密切相关(图 5 - b)。实验结束时,实验组 Chl. a 含量仅为 $0.05 \mu g/L$,极显著低于同期对照组 Chl. a 含量 ($P < 0.01$)。

印度小竹节草对铜绿微囊藻具有较好的抑制作用(图 6)。随着实验时间的延长,印度小竹节草对铜绿微囊藻的抑制率不断增加,培养至第 11 天时,抑藻率高达 99.89%。

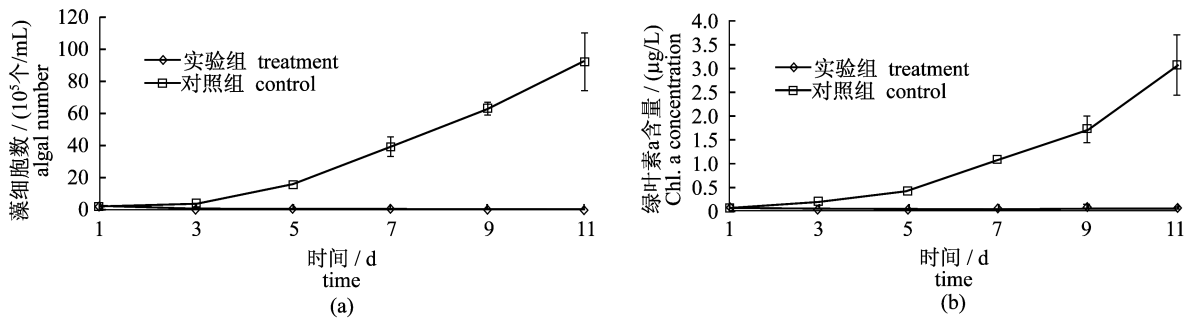


图 5 印度小竹节草对铜绿微囊藻生长和 Chl. a 含量的影响

Fig. 5 Effects on the growth and the chlorophyll - a content of *M. aeruginosa* by *N. indica*

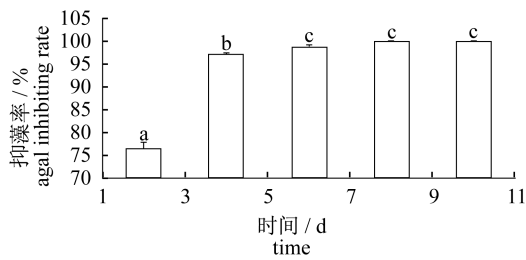


图 6 印度小竹节草的抑藻率变化

图中标有不同字母的数据表示相互之间差异显著 ($P < 0.05$)

Fig. 6 The algal inhibiting rates of *N. indica*

Data with different letters mean significant differences from each other ($P < 0.05$)

2.4 印度小竹节草与铜绿微囊藻共培养条件下的营养盐浓度变化

为探究是否因营养盐竞争而导致铜绿微囊藻的生长衰退,实验对共培养液中 TP、TN、NO₃ - N 和 NH₄ - N 的浓度变化进行了跟踪检测(图 7)。

实验初期,实验组和对照组培养液中的 TP 浓度均升高,之后实验组中 TP 浓度大幅度下降,与对照组存在极显著差异 ($P < 0.01$)。实验组 NH₄ - N 的初始浓度约为 0.30 mg/L,到第 7 天达到 8.13 mg/L,极显著地高于对照组 NH₄ - N 浓度 ($P < 0.01$),第 11 天又下降至较低水平。同时发现,实验组 TN 与 NO₃ - N 的变化趋势基本

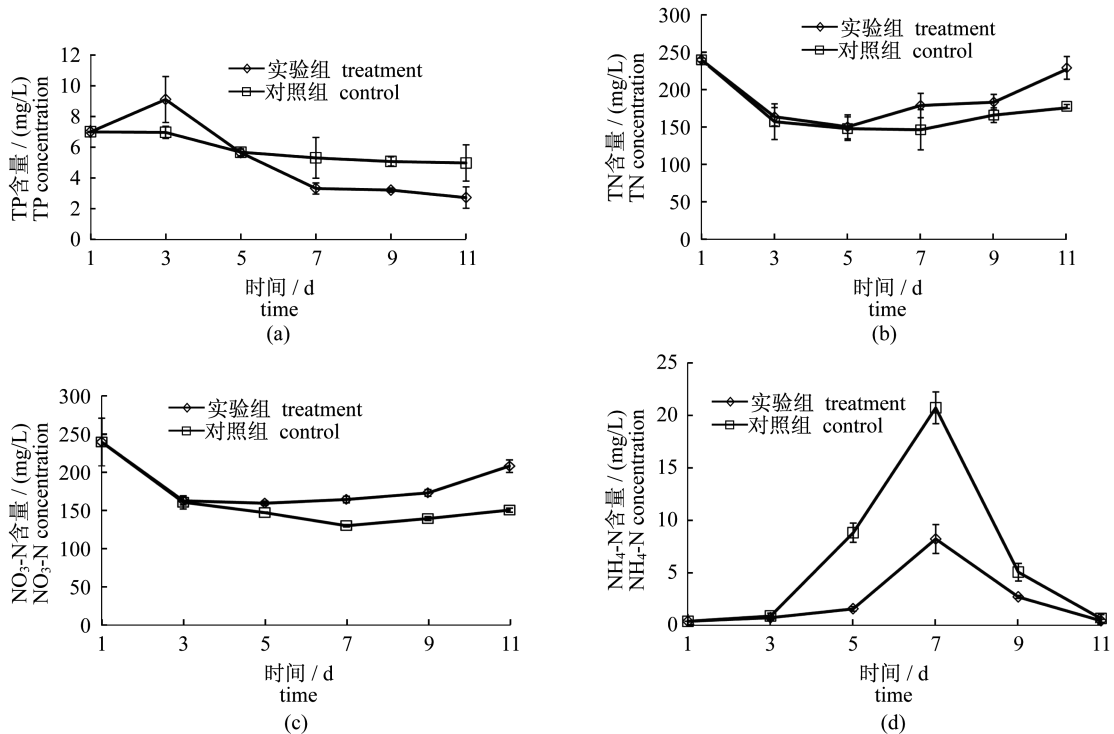


图 7 印度小竹节草与铜绿微囊藻共培养液的 TP、TN、NH₄ - N 和 NO₃ - N 浓度变化

Fig. 7 The variations of TP, TN, NH₄ - N and NO₃ - N concentrations in *M. aeruginosa* culture solution with *N. indica*

一致,呈现先降后升的趋势,实验后期显著高于对照组($P < 0.05$)。

3 讨论

N、P 是水质监测分析中的常规指标,同时也是湖泊富营养化评价的重要指标,水体中总氮主要包括溶解性氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮以及大部分有机氮化合物,总磷则主要包括元素磷、正磷酸盐、焦磷酸盐以及有机基团结合的磷酸盐等。水生植物具有大量吸收水体中营养盐的特性,在净化水体以及稳定水生态系统方面发挥着重要作用^[18]。针对水生植物净化富营养化水体的研究已有大量报道,王超等^[19]对黄花水龙(*Jussiaea stipulacea* Ohwi)去除富营养水体 N、P 的效果进行了研究,结果发现,夏季黄花水龙对 TN 去除率约为 60%,冬季黄花水龙对 TN 和 TP 去除率分别约为 23% 和 20%。Akinbile 等^[20]比较了大藻和水葫芦对养殖废水的处理效果,发现水葫芦较大藻具有更好的修复效果,对总凯氏氮的去除率高达 89.28%。万志刚等^[21]比较了几种水生维管束植物对水中氮、磷的吸收率,同样发现水葫芦对水体中 TN、TP 的去除率最高,分别为 83.09%、80.30%。而本研究中,印度小竹节草在极富营养条件下对 TN、TP 的去除率分别高达 99.46%、90.75%,远远高于水葫芦的 N、P 去除率,且印度小竹节草比水葫芦易于控制,降低了对生态环境造成负面影响的风险。

研究发现,极富营养处理组印度小竹节草对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的吸收先于 $\text{NO}_3\text{-N}$,只有当 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度下降至较低水平,才会对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 具有较强的吸收;而富营养处理组中印度小竹节草对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 一直具有较显著的吸收(图 3)。Hanisak 等^[22]研究发现,当 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度超过 $1.00 \mu\text{mol/L}$ 时就会对刺松藻(*Codium fragile*)的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 吸收产生抑制。Delia 等^[23]也发现,当 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度超过 $5.00 \mu\text{mol/L}$ 时会抑制细江蕨(*Gracilaria foliifera*)对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的吸收,本研究结果与 Hanisak 等^[22]和 Delia 等^[23]的研究结果一致。这主要是因为植物体对其所吸收的营养盐类型具有优先选择性,许多大型植物和微藻会优先吸收环境中的 $\text{NH}_4\text{-N}$,当 $\text{NH}_4\text{-N}$ 超过一定浓度时会抑制其对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 吸收^[24-25]。

影响营养物质进入植物体的因素有 2 个,一

是植物体的反应动力学,二是外界营养盐离子的浓度^[26]。其中,前者主要靠植物体自身调节,直观反映为不同植物体具有不同的吸收速率。大量研究表明^[27-29],植物体对 N、P 的吸收速率随着培养液中 N、P 浓度的升高而加快,这可能与 N、P 等营养盐浓度的升高使植物体利用 N、P 的一系列生理过程的底物浓度升高,在一定范围内其同化作用加强有关,这与印度小竹节草对 N、P 吸收速率的变化是一致的。印度小竹节草对 N、P 等营养物质的吸收过程与微藻不同,后者对营养物质吸收缓慢,甚至出现外排现象^[30],而在本研究中,印度小竹节草表现出较强的吸收能力,随着营养程度的逐渐升高并未出现饱和现象,这可能与大型水生植物的营养盐高储存能力有关。随着营养程度的增加,印度小竹节草对水体中 N、P 去除率也随之升高,营养程度对印度小竹节草 N、P 总去除率也存在极显著影响($P < 0.01$),这与杨旻等^[5]的研究结果一致。

庄源益等^[31]指出,植物生长在一起存在的相互作用分为 2 个方面,一是对光照、营养盐、水的竞争作用;二是植物向环境中释放化学物质对另一植物产生化感作用。关于水生植物抑制藻类生长的研究,目前已有过较多报道^[32-34]。巨颖琳等^[35]通过共培养实验发现菹草(*Potamogeton crispus* L.)、光叶眼子菜(*Potamogeton lucens* L.)和金鱼藻(*Ceratophyllum demersum* L.)对铜绿微囊藻具有明显的化感抑制作用,栽培密度为 7 g/L 的光叶眼子菜抑藻率最高,达到 97.57%。而本研究发现,印度小竹节草对铜绿微囊藻具有极显著的抑制作用($P < 0.01$)(图 5,6),且抑藻率较光叶眼子菜更高,达 99.89%。跟踪检测共培养液中 N、P 浓度变化发现,实验组 P 浓度极显著地低于对照组浓度($P < 0.01$)。鉴于实验组和对照组均是在相同的光照和温度条件下进行的,可基本排除光照和温度对铜绿微囊藻的影响。Jiang 等^[36]认为培养基中 NaNO_3 低于 1.27 mmol/L 、 K_3PO_4 高于 0.10 mmol/L 时,铜绿微囊藻就无法正常生长。若把 K_3PO_4 为 0.10 mmol/L 看成铜绿微囊藻缺少 P 的临界值,实验组在第 5 天之后共培养液中 TP 的浓度均低于或接近该临界值,而对照组浓度远高于此临界值,说明铜绿微囊藻的生长受到抑制很可能与培养液中 P 含量不足有关,这与孟丽华等^[37]的研究一致。此外,实验组

共培养液中 $\text{NO}_3 - \text{N}$ 含量在后期呈不断上升趋势(图 7),这可能是因为印度小竹节草与铜绿微囊藻的竞争作用,导致铜绿微囊藻的生长衰败,死亡的铜绿微囊藻分解产生 $\text{NO}_3 - \text{N}$ 的速率已超过了印度小竹节草的吸收速率,从而导致 $\text{NO}_3 - \text{N}$ 含量不断上升^[38]。

随着栽培密度的增大,TN 和 TP 去除率随之增加,密度为 4 g/L 的印度小竹节草对 N、P 营养盐总去除率最高,相对去除速率最快(图 1,2)。在印度小竹节草与铜绿微囊藻共培养实验中,密度为 4 g/L 的印度小竹节草对铜绿微囊藻的抑藻率高达 99.89% (图 6)。考虑到栽培密度为 4 g/L 时,印度小竹节草对富营养水体和极富营养水体具有较好的适应性,并能够短时高效地去除富营养水体中的营养物质,在印度小竹节草水体生态修复的实际运用中,4 g/L 可作为比较理想的栽培密度。

印度小竹节草对水体中 $\text{NH}_4 - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2 - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3 - \text{N}$ 、TP 和 TN 具有较好的吸收效果,并随着营养盐浓度的升高吸收速率加快。同时,印度小竹节草对铜绿微囊藻表现出高效的抑制作用。因此,在富营养水体中人工养殖印度小竹节草,利用其高效吸收能力吸附水体中的营养盐,再通过收获将过量的营养盐转出污染区域,可在缓解水体富营养化和预防铜绿微囊藻水华过程中起到很好的作用。

参考文献:

- [1] Smith V H, Schindler D W. Eutrophication science: where do we go from here [J]. Trends in Ecology & Evolution, 2009, 24(4): 201 - 207.
- [2] Liu H L, Jin X C, Tu Q Y. The standard methods in lake eutrophication investigation (second edition) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990, 1 - 4. [刘鸿亮, 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范 (第 2 版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990, 1 - 4.]
- [3] Hu M H, Ao Y S, Yang X E, et al. Treating eutrophic water for nutrient reduction using aquatic macrophytes (*Ipomoea aquatica* Forsskal) in a deep flow technique system [J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(5): 607 - 615.
- [4] Lu Q, He Z L, Graetz D A, et al. Phytoremediation to remove nutrients and improve eutrophic stormwaters using water lettuce (*Pistia stratiotes* L.) [J]. Environment Science and Pollution Research, 2010, 17(1): 84 - 96.
- [5] Yang M, Wu X G, Zhou L F, et al. Study on the capacity of purification of acorus emamus L. in eutrophic water of different degree [J]. Environmental Science and Management, 2007, 32(10): 77 - 80. [杨旻, 吴小刚, 周连凤, 等. 菖蒲对不同程度富营养化水体的净化作用研究. 环境科学与管理, 2007, 32(10): 77 - 80.]
- [6] Hershner C, Havens K J. Managing invasive aquatic plants in a changing system: strategic consideration of ecosystem services [J]. Conservation Biology, 2008, 22(3): 544 - 550.
- [7] He Z R. Seven microcystins from Microcystis water bloom in Lake Dalai, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 1997, 9(1): 113 - 119.
- [8] Qian Z P, Feng Y, Sun L, et al. Inhibitory effects of *Ceratophyllum oryzetorum* on the growth of *Microcystis aeruginosa* [J]. Bulletin of Botanical Research, 2006, 26(1): 79 - 83. [钱志萍, 冯燕, 孙莉, 等. 金鱼藻对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究. 植物研究, 2006, 26(1): 79 - 83.]
- [9] Mulderij G, Mooij W M, Smolders A J P, et al. Allelopathic inhibition of phytoplankton by exudates from *Stratiotes aloides* [J]. Aquatic Botany, 2005, 82(4): 284 - 296.
- [10] Shu J H. Assessment of eutrophication in main lakes of China [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 1993, 24(6): 616 - 620. [舒金华. 我国主要湖泊富营养化程度的评价. 海洋与湖沼, 1993, 24(6): 616 - 620.]
- [11] Rippka R, Desrullles J, Waterbury J B, et al. Generic assignment, strain histories and properties of pure cultures of cyanobacteria [J]. Journal of General Microbiology, 1979, 111(1): 1 - 61.
- [12] Huang Z X, Zhang Y J, Ma H F, et al. A comparative study on removal efficiency of four submerged plants on phosphorus and nitrogen in eutrophic water under different planting density [J]. Ecological Science, 2011, 30(2): 102 - 106. [黄子贤, 张饮江, 马海峰, 等. 4 种沉水植物对富营养化水体氮磷的去除能力. 生态科学, 2011, 30(2): 102 - 106.]
- [13] Liu J G, Lu K G, Lin W, et al. Effects of temperature, nitrogen concentration and N/P ratio on N uptake rates of *Kappaphycus alvarezii* [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2008, 39(5): 529 - 535. [刘建国, 路克国, 林伟, 等. 温度、氮

- 浓度和氮磷比对长心卡帕藻 (*Kappaphycus alvarezii*) 吸收氮速率的影响. 海洋与湖沼, 2008, 39(5): 529 - 535.]
- [14] Zhang W M, Liao R H, Xu Z L, *et al.* Study on inhibition of *Microcystis aeruginosa* growth by natural plants [J]. Beijing water, 2011, 5: 18 - 21. [张卫明, 廖日红, 许志兰, 等. 5种天然植物对铜绿微囊藻的抑制效果研究. 北京水务, 2011, 5: 18 - 21.]
- [15] Repka S, Koivula M, Harjunpa V, *et al.* Effects of phosphate and light on growth of and bioactive peptide production by the cyanobacterium *Anabaena* strain 90 and its anabaenopeptilide mutant [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2004, 70(8): 4551 - 4560.
- [16] Zhou Q Y, Gao T Y. Environmental microbiology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000, 324 - 325. [周群英, 高廷耀. 环境工程微生物学. 北京: 高等教育出版社, 2000, 324 - 325.]
- [17] Ding H J, Zhang W H, Zhou W B, *et al.* Study on growth of *Microcystis aeruginosa* affected by two phenolic allelochemicals [J]. Environmental Science and Technology, 2007, 30(7): 1 - 3. [丁惠君, 张维昊, 周伟斌, 等. 两种酚酸类化感物质对铜绿微囊藻生长的影响. 环境科学与技术, 2007, 30(7): 1 - 3.]
- [18] Han P, Kumar P, Ong B L. Remediation of nutrient-rich waters using the terrestrial plant, *Pandanus amaryllifolius* Roxb [J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, 26(2): 404 - 414.
- [19] Wang C, Zhang W M, Wang P F, *et al.* Removal of nitrogen and phosphorus in eutrophic water by *Jussiaea stipulacea* Ohwi [J]. Environmental Science, 2007, 28(5): 975 - 980. [王超, 张文明, 王沛芳, 等. 黄花水龙对富营养化水体中氮磷去除效果的研究. 环境科学, 2007, 28(5): 975 - 980.]
- [20] Akinbile C O, Yusoff M S. Assessing water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and lettuce (*Pistia stratiotes*) effectiveness in aquaculture wastewater treatment [J]. International Journal of Phytoremediation, 2012, 14(3): 201 - 211.
- [21] Wang Z G, Shen S D, Gu F G, *et al.* Comparative studies on nitrogen and phosphorus absorption in some aquatic higher plants [J]. Freshwater Fisheries, 2004, 34(5): 6 - 8. [万志刚, 沈颂东, 顾福根, 等. 几种水生维管束植物对水中氮、磷吸收率的比较. 淡水渔业, 2004, 34(5): 6 - 8.]
- [22] Hanisak M D, Harlin M M. Uptake of inorganic nitrogen by *Codium fragile* subsp. *Tomentosoides* (Chlorophyta) [J]. Journal of Phycology, 1978, 14(4): 450 - 454.
- [23] Delia C F, Deber J A. Nutritional studies of two red algae. II. Kinetics of ammonium and nitrate uptake [J]. Journal of Phycology, 1978, 14(3): 266 - 272.
- [24] Dortch Q. The interaction between nitrate and ammonium uptake in phytoplankton [J]. Marine Ecology Progress Series, 1990, 61(2): 183 - 201.
- [25] Flynn K J. Algal carbon - nitrogen metabolism: a biochemical basis for modeling the interactions between nitrate and ammonium uptake [J]. Journal of Plant Research, 1991, 13(2): 373 - 387.
- [26] Koch E W. Hydrodynamic diffusion-boundary layers and photosynthesis of the seagrasses *Thalassia testudinum* and *Cymodocea nodosa* [J]. Marine Biology, 1994, 118(4): 767 - 776.
- [27] Li H, Li M Z, Xu Z G, *et al.* Effect of nutrient supply on nitrogen and phosphorus uptake and growth in three species of macroalgae [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2012, 19(3): 462 - 470. [李恒, 李美真, 徐智广, 等. 不同营养盐浓度对3种大型红藻氮、磷吸收及其生长的影响. 中国水产科学, 2012, 19(3): 462 - 470.]
- [28] Jiang H B, Tian X L, Dong S L, *et al.* Effects of nutrient factors on the uptake of nitrogen and phosphorus by *Sargassum thunbergii* [J]. Periodical of Ocean University of China, 2007, 37(s1): 175 - 180. [姜宏波, 田相丽, 董双林, 等. 不同营养盐因子对鼠尾藻氮、磷吸收速率的影响. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2007, 37(s1): 175 - 180.]
- [29] Naldi M, Viaroli P. Nitrate uptake and storage in the seaweed *Ulva rigida* C. Agardh. in relation to nitrate availability and thallus nitrate content in a eutrophic coastal lagoon (Sacca di Goro, Po River Delta, Italy) [J]. Journal of Experimental Marine Biology Ecology, 2002, 269(1): 65 - 83.
- [30] Hu H H, Shi Y J, Cong W, *et al.* Photosynthetic characteristics and nutrient absorption of *Skeletonema costatum* at different nitrogen and phosphorus levels [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2004, 10(16): 735 - 739. [胡晗华, 石岩峻, 丛威, 等. 不同氮磷水平下中肋骨条藻对营养盐的吸收及光合特性. 应用与环境生物学报, 2004, 10(16): 735 - 739.]

- [31] Zhuang Y Y, Zhao F, Dai S G, *et al.* Algal growth inhibition by phytotoxins [J]. *Advances in Environmental Science*, 1995, 3(6): 44 - 50. [庄源益, 赵凡, 戴树桂, 等. 高等水生植物对藻类生长的克制效应. 环境科学进展, 1995, 3(6): 44 - 50.]
- [32] Nakai S, Inoue Y, Hosomi M, *et al.* Growth inhibition of blue - green algae by allelopathic effects of marophytes [J]. *Water Science and Technology*, 1999, 39(8): 47 - 53.
- [33] Körner S, Niekliseh A. Allelopathic growth inhibition of selected Phytoplankton species by submerged macrophytes [J]. *Journal of Phycology*, 2002, 38(5): 862 - 871.
- [34] Rostitano J, Newcombe G, Nicholson B. Ozonation of NOM and toxins in four treated water [J]. *Water Research*, 2001, 35(1): 23 - 32.
- [35] Ju Y L, Li X M. Allelopathic effects of three submerged macrophytes in the Nansi Lake on *Microcystis aeruginosa* [J]. *Journal of Shandong University: Natural Science*, 2011, 46(3): 1 - 8. [巨颖琳, 李小明. 南四湖 3 种沉水植物对铜绿微囊藻化感作用研究. 山东大学学报: 理学版, 2011, 46(3): 1 - 8.]
- [36] Jiang Y, Ji B, Wong R N S, *et al.* Statistical study on the effects of environmental factors on the growth and microcystins production of bloom-forming cyanobacterium-*Microcystis aeruginosa* [J]. *Harmful Algae*, 2008, 7(2): 127 - 136.
- [37] Meng L H, Liu Y X. Inhibitory effects of *Hygrophila dilormis* on the growth of *Microcystis aeruginosa* [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2009, 31(1): 43 - 46. [孟丽华, 刘义新. 水罗兰对不同密度铜绿微囊藻抑制作用的研究. 环境污染与防治, 2009, 31(1): 43 - 46.]
- [38] Sun X J, Qin B Q, Zhu G W. Release of colloidal phosphorus, nitrogen and organic carbon in the course of dying and decomposing of Cyanobacteria [J]. *China Environmental Science*, 2007, 27(3): 341 - 345. [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. 中国环境科学, 2007, 27(3): 341 - 345.]

Study on the bioremediation potential of *Najas indica*

JIANG Weiwei^{1,2}, MAO Yuze³, FANG Jinghui³, DU Meirong³, SUI Haidong³,
LI Min³, FANG Jianguang^{3*}

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry
of Agriculture, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy
of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract: The aim of this paper is to investigate the bioremediation potential of *Najas indica*. In the present study, the removal rates of *N. indica* on nitrogen and phosphorus were analyzed at 4 planting densities (1, 2, 3 and 4 g/L) and 3 eutrophic water degrees (mesotrophic, eutrophic and utmost eutrophic), which detected the concentration of $\text{NH}_4 - \text{N}$, $\text{NO}_3 - \text{N}$, TN and TP. Besides, the inhibitory effect of *N. indica* on the growth of *M. aeruginosa* was studied by the analysis of the number of *M. aeruginosa* and the concentration of nutrients. The results showed that removal rates of *N. indica* on nitrogen and phosphorus were significantly high. At the planting density of 4 g/L, the removal rates of TN and TP were up to 99.50% and 93.45%, respectively, while there is no significant difference between different treatments. Eutrophic degrees have a significant effect on the removal rates of nitrogen and phosphorus. The uptake rates of *N. indica* on nitrogen and phosphorus were increasing as the nutrient increased, and the uptake rates of TN and TP reached the highest 1.11 and 0.15 $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$, respectively. In the utmost eutrophic group, the removal rates of TN and TP also reached the highest 99.46% and 90.75%, respectively, which were significant higher than other eutrophic levels. Meanwhile, *N. indica* had an obviously inhibitory effect on the growth of *M. aeruginosa*, and algal inhibiting rate reached 99.89% in the experimental group. The detection results of water quality showed that the concentration of TP and NH_4 under co-culture condition was lower than control group significantly. Based on the study, *N. indica* presents a potential application for remediation of the eutrophic water ecosystem and prevention of the bloom caused by *M. aeruginosa*.

Key words: *Najas indica*; nitrogen and phosphorus; removal rate; uptake rate; *Microcystis aeruginosa*; algal inhibiting rate

Corresponding author: FANG Jianguang. E-mail: fangjg@ysfri.ac.cn

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (NSFC) – Shandong Joint Fund for Marine Science Research Centers (U1406403); National Marine Public Welfare Research Project (201305043); National Key Technology Support Program under contract (2011BAD13B02)