

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20190425002

http://www.yykxjz.cn/

李晨露, 常孟阳, 董静, 代杜娟, 王佳慧, 尚向阳, 范聪利. 富藻养殖水体中金鱼藻和篦齿眼子菜的抑藻效果研究. 渔业科学进展, 2020, 41(4): 125–133

Li CL, Chang MY, Dong J, Dai DJ, Wang JH, Shang XY, Fan CL. Responses of eutrophic ponds to *Ceratophyllum demersum* and *Potamogeton pectinatus*. Progress in Fishery Sciences, 2020, 41(4): 125–133

富藻养殖水体中金鱼藻和篦齿眼子菜的抑藻效果研究*

李晨露 常孟阳 董静^① 代杜娟 王佳慧 尚向阳 范聪利

(河南师范大学 水产学院 新乡 453007)

摘要 夏季高温时, 养殖水体水华现象频繁发生, 给养殖业带来巨大的损失。常见水生植物释放的活性物质在低浓度下可以起到抑藻作用, 对藻类调控具有重要意义。本研究采用实验室静态模拟方法, 取养殖池塘暴发蓝藻水华的水体, 与沉水植物金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)及篦齿眼子菜(*Potamogeton pectinatus*)进行共培养, 研究这2种沉水植物对养殖水华水体营养水平、藻类生长、藻类结构及浮游藻类生物多样性的影响。结果显示, 金鱼藻和篦齿眼子菜可显著降低水华水体氮、磷等营养水平($P<0.05$); 金鱼藻和篦齿眼子菜可有效抑制水华蓝藻(*Cyanobacteria*)生长, 尤其对颤藻和微囊藻(*Microcystis* sp.)效果显著($P<0.05$), 且篦齿眼子菜对水华蓝藻抑制效果更为显著。实验结束时, 篦齿眼子菜培养组藻密度下降93.6%, 生物量下降98.9%, 叶绿素a含量下降60.5%; 金鱼藻培养组藻密度下降72.5%, 生物量下降86.8%, 叶绿素a含量下降54.3%; 金鱼藻和篦齿眼子菜的存在可促进养殖水体浮游藻类生物多样性增加, 且金鱼藻提高浮游藻类生物多样性效果更显著。金鱼藻培养组浮游藻类生物多样性升高98.4%, 篦齿眼子菜培养组浮游藻类生物多样性升高50.3%。本研究结果可为未来生态养殖提供理论依据和参考。

关键词 金鱼藻; 篦齿眼子菜; 浮游藻类; 养殖池塘; 水华

中图分类号 S931 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2020)04-0125-09

近年来, 我国水体富营养化趋势日益严峻, 浮游藻类爆发性生长, 形成蓝藻(*Cyanobacteria*)水华, 导致水体生物多样性偏低, 且养殖池塘水华主要优势种为微囊藻(*Microcystis* sp.), 占99%以上(常孟阳等, 2019)。微囊藻可释放毒素到水中, 对水生生物、养

殖水产品(鱼、虾)等造成危害(Rastogi *et al*, 2014; 沈明明等, 2017)。目前, 为解决水华治理问题, 提出许多物理、化学和生物方法, 常用方法多为物理打捞和泼洒化学试剂等, 但物理打捞费时费力, 化学试剂容易造成污染, 解决效果不尽人意, 因此, 水生植物

* 国家自然科学基金青年科学基金项目(31500380)、河南省科技攻关项目(152102310314; 172102210352; 162102310443; 172102310751)、河南师范大学博士启动基金项目(qd14183)、河南省高校科技创新团队支持计划(14IRTSTHN013)和河南省水产学重点学科共同资助 [This work was supported by National Science Foundation for Young Scholars (31500380), Science and Technology Development of Henan Province (152102310314; 172102210352; 162102310443; 172102310751)], Doctoral Startup Foundation of Henan Normal University (qd14183), Henan University Science and Technology Innovation Team Support Program(14IRTSTHN013), and Key Disciplines in Aquaculture of Henan Province]. 李晨露, E-mail: 18848967589@163.com

^① 通讯作者: 董静, 副教授, E-mail: happydj111@163.com

收稿日期: 2019-04-25, 收修改稿日期: 2019-06-04

的抑藻研究成为当今热点。沉水植物个体大、生命周期长、吸收和储存营养盐的能力强,大量研究表明,水生植物不仅可以与藻类竞争营养和光照,同时,水生植物能够向水中分泌克藻物质如萜类化合物、类固醇等,可有效抑制其生长或杀死藻类,从而控制“水华”的发生(Nakai *et al*, 2012; Zuo *et al*, 2015)。这些抑藻植物释放的化学物质在低浓度下可以起到抑制作用,具有良好的生态安全性(邹华等, 2012)。

目前,发现具有抑藻作用的沉水植物已有 30 多种(肖溪等, 2009)。鲜啟鸣等(2005)研究发现,金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)、篦齿眼子菜(*Potamogeton pectinatus*)、苦草(*Vallisneria spiralis*)等具有抑制铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)的作用,其中,金鱼藻和篦齿眼子菜的抑藻效果相对较强。Hilt 等(2008)研究发现,水剑叶(*Stratiotes aloides*)、水盾草(*Cabomba caroliniana*)等对水华藻类有很强的抑制作用。除此之外,黑藻(*Hydrilla verticillata*)、狐尾藻(*Myriophyllum verticillatum*)、菹草(*Potamogeton crispus*)、伊乐藻(*Eloдея canadensis*)等都可以明显抑制水华藻类的生长(Zhu *et al*, 2010; 姚远等, 2016; Wang *et al*, 2017; 张之浩等, 2017)。

已有研究多集中于篦齿眼子菜和金鱼藻对水体氮、磷等营养盐的去除效果及沉水植物对单一优势藻类(如铜绿微囊藻)的影响。张帆等(2012)研究发现,篦齿眼子菜对水体中氮磷有较好的去除效果:总氮的去除率高达 63.06%,对总磷的去除率高达 96.63%。邢秀敏等(2018)研究了狐尾藻、金鱼藻及篦齿眼子菜 3 种沉水植物组合对水体的净化能力,发现狐尾藻加金鱼藻对水体营养盐有较好的去除效果。邢春玉等(2018)研究了水生植物群落对水华鱼腥藻(*Anabaena flos-aquae*)和铜绿微囊藻的化感抑制作用。但实际水体中藻类种类繁多,影响因素不一,关于沉水植物对水体中综合藻类影响的研究较少。本研究采用静态模拟野外实验的方法,以常见沉水植物金鱼藻和篦齿眼子菜为实验材料,研究其对养殖池塘浮游藻类的影响,旨在为控制养殖池塘水华的发生提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

金鱼藻、篦齿眼子菜均采自于河南师范大学养殖基地池塘(35°19'38.363" N, 113°54'09.482" E),采回后用自来水洗净,去除杂质,在实验室进行驯化培养。实验水体取自河南师范大学养殖基地处于蓝藻水华

暴发状态的养殖池塘。

1.2 实验设计

从河南师范大学基地池塘同一处一次性取自然水样 6 L,用量筒平均分到 3 个椭圆透明玻璃鱼缸(高 12.5 cm,底部直径 10 cm,最大直径 20 cm)中,无底泥,设置 3 个实验组,第 1 组为空白对照(Control group, CG);第 2 组放入长约 8~12 cm、鲜重约 9 g、生长状况良好、用蒸馏水洗净的金鱼藻植株(*C. demersum* treatment, CD);第 3 组放入鲜重约 9 g、生长良好、用蒸馏水洗净的篦齿眼子菜植株(*P. pectinatus* treatment, PP);每组设置平行,植株投放量参考(Dong *et al*, 2018)得出,在 4.5 g/L 有最大影响为参考。实验平均光照强度为 3000 lux,光暗比为 12:12,水温为 20℃~25℃,实验周期为 21 d,实验期间每天(09:00、21:00)用玻璃棒混匀水体,每 7 d 取水样 50 ml,分别用于藻细胞密度、种类、生物量和叶绿素 *a* 含量(Chl.*a*)的测定及种类鉴定等。

1.3 测定方法

蓝藻水华水样处理:取样前用玻璃棒混匀水体,取出 50 ml 样品,加入 1 ml 鲁哥试剂进行固定,静置沉降 48 h 后,采用内径为 3 mm 的浓缩管,管头缠绕过滤布防止藻细胞流出,利用虹吸法(虹吸流速流量不宜过大,以成滴缓慢留下为宜)将沉淀上清液缓慢吸出,切不可搅动底部,剩下约 10 ml 沉淀物,倒入量筒测定体积,以备计数。

蓝藻水华水样中藻类计数及鉴定:将浓缩沉淀后的水样充分摇匀,使用移液枪吸出 0.1 ml 置于浮游植物计数框内,在 10×40 倍显微镜下观察计数,每个样品计数 2 次取其平均值,每次计数 10~20 格。同 1 个样品的 2 次计数结果和平均数之差不大于其平均数的±15%。取平均数作为计数结果。浮游植物鉴定参考《中国淡水藻类》(胡鸿钧等, 2006),并以密度>5%浮游藻类总密度定义为优势种。

叶绿素 *a* 含量测定:采用乙醇分光光度计法(Lichtenthaler *et al*, 2001),取 3 ml 样品放入 10 ml 离心管中,8000 r/min 离心 10 min,弃上清液后,向藻细胞中加入 95%乙醇 3 ml,在 4℃冰箱中黑暗静置 24~36 h 充分提取(15 h 左右时,上下摇动 1 次)。提取结束后,8000 r/min 离心 10 min,取上清液,采用分光光度计(整个过程需避光)分别测定 665 和 649 nm 波长下的吸光度(测定前用 95%乙醇校零)。按下列公式计算叶绿素 *a* 含量(mg/L):

$$C_{Chl.a} = 13.95 \times A_{665} - 6.88 \times A_{649} \quad (1)$$

水化指标测定: 实验结束时对水体总磷(TP)、可溶性总磷(TDP)、总氮(TN)、可溶性总氮(TDN)、氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、化学需氧量(COD)等理化因子进行测定。水样营养盐测定方法参考《水和废水检测分析方法》第四版(魏复盛等, 2002)。化学需氧量(COD)的测定方法参考《养殖水环境化学实验》(雷衍之, 2006)。

1.4 数据分析

密度和生物量的计算方法参考《水生生物学》(赵文, 2005)。浮游藻类生物多样性采用 Shannon-Weiner 指数表示(Shannon *et al.*, 1949):

$$H = -\sum_{i=1}^s P_i \ln P_i \quad (2)$$

式中, S 为物种数目, P_i 为物种 i 的个体在全体个体中的比例, H 为物种的多样性指数。

采用软件 SPSS 22.0 对数据进行单因素方差分析(One-way ANOVA), 分析不同处理组之间的差异, 并使用 Tukey HSD 检验进行多重比较, 各项重复测量指标采用重复测量方差分析, 组间多重比较采用 LSD 检验, 使用 Excel 2007 进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同沉水植物培养下水体营养盐的变化情况

实验初始, 水样采自同一处, 水体营养盐含量及理化指标相同, 经过 21 d 培养后, 实验组水体的理化性质发生明显改变, 结果见图 1~图 4。相比对照组, 加入沉水植物的实验组中, 各形式存在的 N 含量均明显发生变化, TN 含量显著减低, TDN 含量同样有明显下降, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在不同处理组也有一定程度的下降, 相反的, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在不同组中均有显著升高; 同时, TP、TDP 含量显著下降($P<0.05$); 实验组中化学需氧量也明显降低。研究表明, 加入沉水植物(金鱼藻、篦齿眼子菜)可显著降低水体营养水平, 且篦齿眼子菜对 P 的吸收较金鱼藻效果更明显。

2.2 2 种不同沉水植物培养下的浮游藻类组成及种类数情况

实验期间, 水体共鉴定出绿藻门(Chlorophyta)、硅藻门(Bacillariophyta)、蓝藻门(Cyanophyta) 3 门 13 种(属)藻类; 其中, 绿藻门种数最多, 共 8 种, 占浮游植物总种数的 61.5%; 蓝藻门次之, 为 4 种, 占浮游植物总种数的 30.8%; 硅藻 1 种, 占浮游植物总种数的 7.7%。

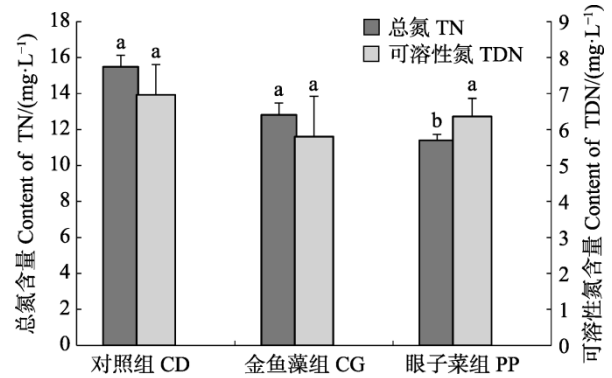


图1 不同处理组水体总氮、可溶性氮浓度变化
Fig.1 Changes in concentrations of TN and TDN in different treatment groups

同一指标中标有不同小写字母表示组间有显著性差异($P<0.05$), 标有相同小写字母者表示组间无显著性差异($P>0.05$), 下同

The means with different letters are significantly different at the 0.05 probability level, and the means with the same letters within the same column are not significantly different. The same as below

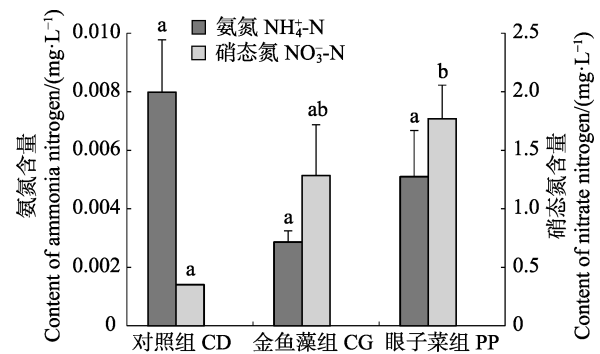


图2 不同处理组水体氨氮、硝态氮浓度变化
Fig.2 Changes in concentrations of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in different treatment groups

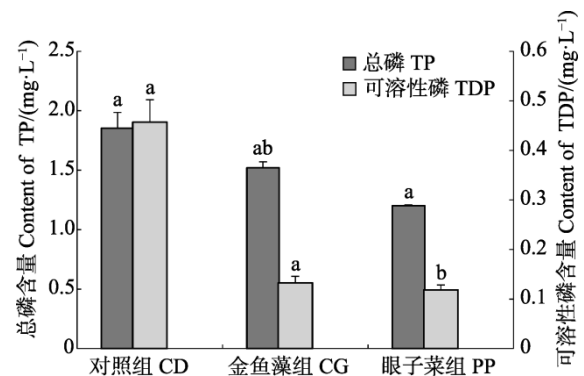


图3 不同处理组水体总磷、可溶性磷浓度变化
Fig.3 Changes in concentrations of TP and TDP in different treatment groups

浮游藻类组成见表 1~表 3。从藻类优势地位分析, 蓝藻门的颤藻和微囊藻始终处于优势地位, 研究表明,

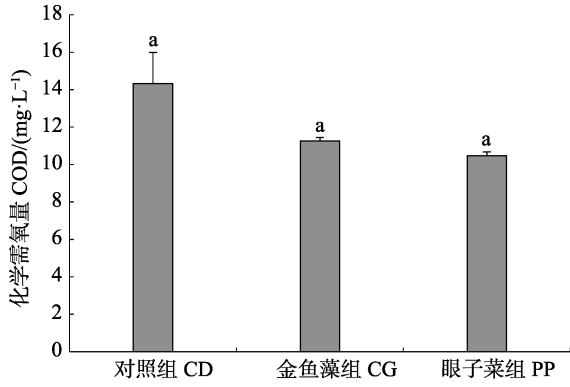


图4 不同处理组水体化学需氧量变化
Fig.4 Changes of COD in different treatment groups

对照组中,颤藻和微囊藻优势地位持续升高;实验组中,14 d 和 21 d 颤藻和微囊藻优势地位显著下降。

2.3 2 种不同沉水植物培养下的浮游藻类优势种密度变化情况

结合浮游藻类变化(表 1~表 3)及优势种分析发现,主要优势种为蓝藻门的颤藻和微囊藻,分析不同沉水植物影响下,蓝藻门优势种藻类的变化(图 5)发现,对照组中,优势种藻类数量持续增多。实验组中,优势种藻类数量在 14 d 出现显著下降(P<0.05)。实验进行到 21 d,与对照组相比,金鱼藻培养组优势种藻类密度下降 73.3%;篦齿眼子菜培养组下降 93.3%。

表 1 对照组浮游藻类组成及种类数变化
Tab.1 Temporal variation of phytoplankton in the control group during the experimental periods

浮游植物 Phytoplankton		0 d	7 d	14 d	21 d
绿藻门 Chlorophyta	爪哇栅藻 <i>Scenedesmus javaensis</i>	++	++	++	++
	四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i>	++	++	++	++
	斜生栅藻 <i>Scenedesmus obliquus</i>	++			
	盘星藻 <i>Pediastrum</i> sp.		+		+
	空星藻 <i>Coelastrum</i> sp.		+	+	
	集星藻 <i>Actinastrum</i> sp.	+			
	狭形纤维藻 <i>Ankistrodesmus angustus</i>				
	卵囊藻 <i>Oocystis</i> sp.	+	++	++	+
硅藻门 Bacillariophyta	小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	+	+		
蓝藻门 Cyanophyta	微囊藻 <i>Microcystis</i> sp.	++++	++++	++++	++++
	颤藻 <i>Oscillatoria</i> sp.	++++	+++++	+++++	+++++
	平裂藻 <i>Merismopedia</i> sp.	+	+		
	螺旋藻 <i>Spirulina</i> sp.				
	种类数 Species number	9	9	6	6

注: +: ×10³ cell/ml; ++: ×10⁴ cell/ml; +++: ×10⁵ cell/ml; ++++: ×10⁶ cell/ml; +++++: ×10⁷ cell/ml

表 2 金鱼藻培养条件下浮游藻类组成及种类数变化
Tab.2 Temporal variation of phytoplankton in the presence of *C. demersum* during the experimental periods

浮游植物 Phytoplankton		0 d	7 d	14 d	21 d
绿藻门 Chlorophyta	爪哇栅藻 <i>S. javaensis</i>	++	++	++	++
	四尾栅藻 <i>S. quadricauda</i>	++	++	++	+++
	斜生栅藻 <i>S. obliquus</i>	++			
	盘星藻 <i>Pediastrum</i> sp.		+		+
	空星藻 <i>Coelastrum</i> sp.				+
	集星藻 <i>Actinastrum</i> sp.	+			
	狭形纤维藻 <i>A. angustus</i>		+		
	卵囊藻 <i>Oocystis</i> sp.	+	+	++	++
硅藻门 Bacillariophyta	小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	+			
蓝藻门 Cyanophyta	微囊藻 <i>Microcystis</i> sp.	++++	++++	++++	++++
	颤藻 <i>Oscillatoria</i> sp.	++++	+++++	++++	++++
	平裂藻 <i>Merismopedia</i> sp.	+			
	螺旋藻 <i>Spirulina</i> sp.		+		
	种类数 Species number	9	8	5	7

表 3 篦齿眼子菜培养条件下浮游藻类组成及种类数变化
Tab.3 Temporal variation of phytoplankton in the presence of *P. pectinatus* during the experimental periods

浮游植物 Phytoplankton		0 d	7 d	14 d	21 d
绿藻门 Chlorophyta	爪哇栅藻 <i>S. javaensis</i>	++	++	++	++
	四尾栅藻 <i>S. quadricauda</i>	++	++	++	++
	斜生栅藻 <i>S. obliquus</i>	++			
	盘星藻 <i>Pediastrum</i> sp.		++	+	+
	空星藻 <i>Coelastrum</i> sp.				
	集星藻 <i>Actinastrum</i> sp.	+			
	狭形纤维藻 <i>A. angustus</i>				
	卵囊藻 <i>Oocystis</i> sp.	+	+		
硅藻门 Bacillariophyta					
	小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	+			
蓝藻门 Cyanophyta	微囊藻 <i>Microcystis</i> sp.	++++	++++	++++	++++
	颤藻 <i>Oscillatoria</i> sp.	++++	+++++	+++	+++
	平裂藻 <i>Merismopedia</i> sp.	+			
	螺旋藻 <i>Spirulina</i> sp.				
	种类数 Species number	9	6	5	5

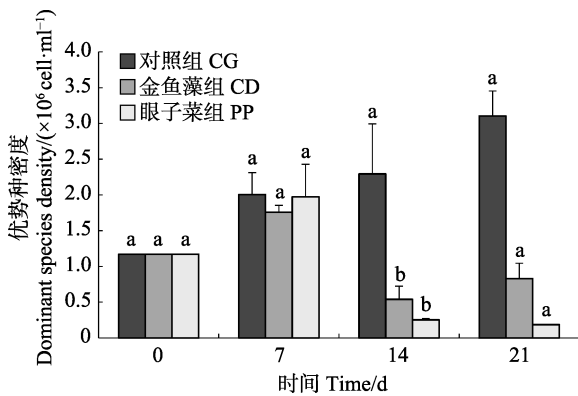


图 5 不同培养条件对蓝藻门藻类密度的影响

Fig.5 Effects on dominant cyanobacteria density in the absence or presence of submerged macrophytes

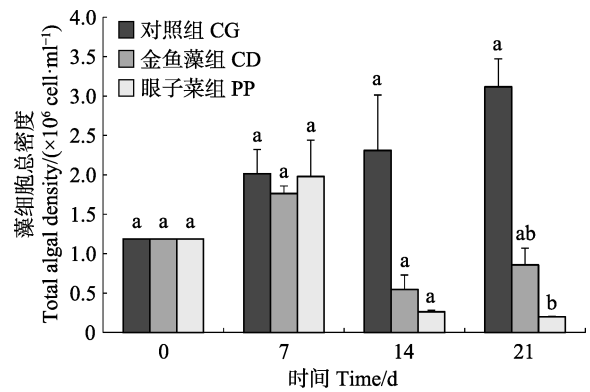


图 6 不同培养条件对浮游藻类总密度的影响

Fig.6 Effects on the total algal density in the absence or presence of submerged macrophytes

2.4 2 种不同沉水植物的培养下的浮游藻类生长情况

由于蓝藻门的颤藻和微囊藻占水体的主要优势地位,因此,水体中藻细胞总密度与优势种变化情况一致,对照组藻细胞总密度持续增长,实验组藻细胞密度在 14 和 21 d 明显呈下降趋势。生物量与总密度趋势一致。实验进行至 21 d,与对照组相比,金鱼藻培养组藻密度下降 72.5%,生物量下降 86.8%;篦齿眼子菜培养组藻密度下降 93.6%,生物量下降 98.9% (图 6~图 7)。金鱼藻和篦齿眼子菜这 2 种沉水植物对藻类生长都有抑制作用,且篦齿眼子菜对藻类生长显著抑制($P<0.05$)。

2.5 2 种不同沉水植物的培养下浮游藻类叶绿素 a 含量变化情况

在不同培养条件下,叶绿素 a 含量变化情况见

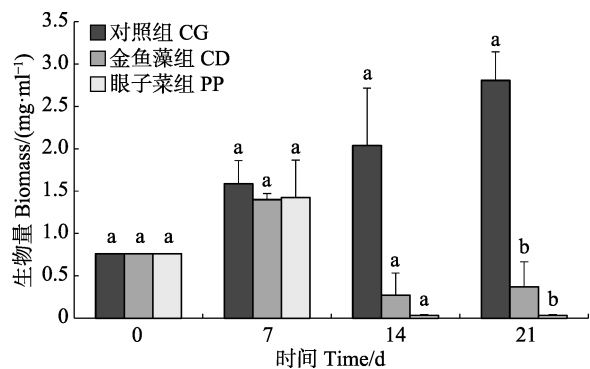


图 7 不同培养条件对藻细胞生物量的影响

Fig.7 Effects on the algal biomass in the absence or presence of submerged macrophytes

图 8。实验至 14 d,金鱼藻培养组与篦齿眼子菜培养组叶绿素 a 含量显著低于对照组($P<0.05$),实验进行至 21 d,与对照组相比,金鱼藻培养组叶绿素 a 含量

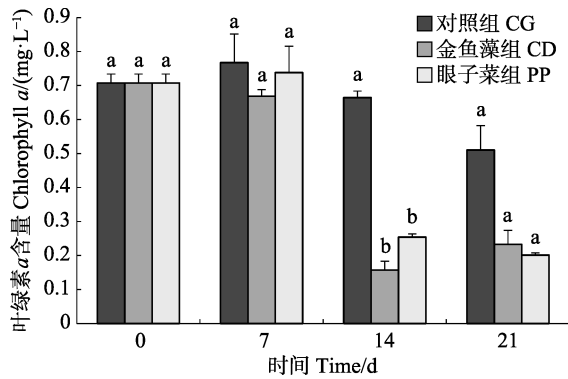


图8 不同培养条件对叶绿素 *a* 含量的影响

Fig.8 Effects on the Chl.a contents in the absence or presence of submerged macrophytes

下降 54.3%；篦齿眼子菜培养组叶绿素 *a* 含量下降 60.5%。

2.6 不同实验条件下浮游藻类生物多样性变化情况

浮游藻类生物多样性指数变化(图 9)，实验过程中，对照组浮游藻类生物多样性持续降低，实验组浮游植物生物多样性明显升高，实验进行至 21 d，与对照组相比，金鱼藻培养组浮游藻类生物多样性升高 98.4%；篦齿眼子菜培养组升高 50.3%。在提高浮游藻类生物多样性方面，金鱼藻较篦齿眼子菜效果更显著($P<0.05$)。

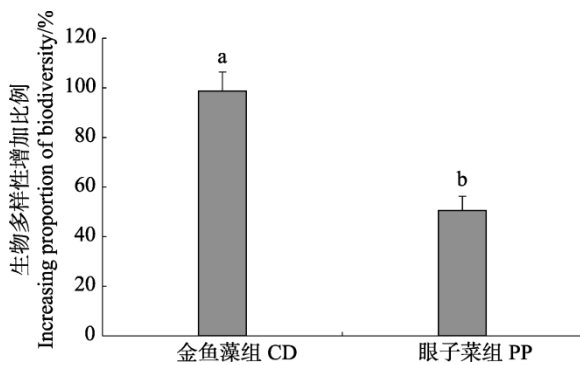


图9 不同培养条件对浮游藻类生物多样性的变化

Fig.9 Effects on the algal biodiversity in the absence or presence of submerged macrophytes

3 讨论

近些年来，利用水生植物抑制藻类生长引起了广泛关注，金鱼藻和篦齿眼子菜作为湖泊、河流常见的沉水植物，利用它们抑制水华藻类生长，分析沉水植物对藻类的化感抑制作用，对养殖池塘水华现象的治理有一定的现实意义。

本研究立足于为解决水华问题提供理论依据，研

究了沉水植物金鱼藻和篦齿眼子菜对养殖水体的影响。营养盐对水生植物的生长有重要意义(韩婷婷等, 2018)，有大量研究发现，沉水植物可吸收水中营养盐，降低水体营养水平，关于常见沉水植物金鱼藻和篦齿眼子菜的研究也屡见不鲜。刘俊等(2012)研究发现，金鱼藻可去除水样 90.01%的 TN、35.13%的 TP 和 72.67%的 COD，促进水质由中富营养型转变为贫营养型。在张帆等(2012)的研究中，篦齿眼子菜对 TN 的去除率达 63.06%，对 TP 的去除率达 96.63%，对水体营养有明显的降低作用。本研究发现，金鱼藻和篦齿眼子菜可有效降低水体 TN、TDN 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的含量，同时， $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量明显增加， NO_3^- 是氧化分解的最终产物，随着水体有机物氧化分解的进行，水体逐渐达到自净效果，同时，金鱼藻和篦齿眼子菜显著降低 TP、TDP 和 COD 含量，水体营养水平大幅度降低，有利于蓝藻水华的消亡。

水生植物与藻类之间的作用是相互的，二者之间既有相互竞争、抢夺营养的关系，植物分泌的物质对藻类可能造成影响，同样藻类释放的分泌物也会对植物造成影响。本实验初期，浮游藻类密度、生物量及叶绿素 *a* 含量持续增长，可能由于沉水植物处于适应阶段，分泌至水体中的抑藻物质较少；14 d 开始，实验组浮游藻类密度、生物量及叶绿素 *a* 含量显著下降($P<0.05$)，此时抑藻效果明显，21 d，浮游藻类密度、生物量及叶绿素 *a* 含量保持相对稳定，也许是因为抑藻物质损耗或分泌速率下降的原因(陈德辉等, 2004; 徐洁等, 2008)。至实验结束时，金鱼藻和篦齿眼子菜对养殖池塘水华水体浮游藻类有明显抑制作用，且篦齿眼子菜效果更显著($P<0.05$)。孙颖颖等(2012)研究显示，共生条件下，金鱼藻能显著抑制颤藻、水华束丝藻(*Aphanizomenon flos-aquae*)、衣藻(*Chlamydomonas* sp.)、实球藻(*Pandorina morum*)和纤维藻(*Ankistrodesmus* sp.) 5 种水华微藻的生长。吴溶等(2010)研究表明，金鱼藻和狐尾藻能很好地抑制铜绿微囊藻的生长。姜小玉等(2018)研究发现，金鱼藻能显著抑制铜绿微囊藻的增殖。何宗祥等(2016)研究发现，金鱼藻与一定密度铜绿微囊藻共生时具有较好的抑藻作用。巨颖琳等(2011)研究中，发现眼子菜(*Potamogeton lucens*)对铜绿微囊藻的抑制作用比金鱼藻更好。这些与本研究结果一致。

与已有研究报道相似，沉水植物化感效应具有物种选择性。杨琳等(2008)研究发现，伊乐藻和篦齿眼子菜均对斜生栅藻的生长具有化感效应，都表现为“低促高抑”的现象，且篦齿眼子菜对斜生栅藻的抑制效果较伊乐藻好。郑耀辉等(2007)研究表明，金鱼藻

种植水对铜绿微囊藻和纤细席藻(*Phormidium tenue*)有明显抑制作用, 金鱼藻对小球藻(*Chlorella* sp.)有明显抑制作用, 对四尾栅藻无明显抑制作用, 反而有一定的促进作用。陈德辉等(2004)发现, 篦齿眼子菜种植水对栅藻(*Scenedesmus* sp.)都有促进作用, 对微囊藻有抑制作用。本研究中, 养殖池塘水体藻类主要优势种为蓝藻门的颤藻和微囊藻, 且始终处于优势地位, 在共培养实验组中, 由于篦齿眼子菜和金鱼藻的影响, 颤藻和微囊藻优势地位显著下降($P<0.05$), 绿藻门栅藻逐渐增多, 成为优势种群之一。本研究结果与相关报道结果一致: 金鱼藻和篦齿眼子菜对蓝藻门颤藻和微囊藻有一定的抑制作用, 对绿藻门栅藻有一定的促进作用。

从本实验浮游藻类种类组成及变化(表1~表3)来看, 实验组中水华蓝藻(微囊藻、颤藻和平裂藻)的种类及数量持续下降, 绿藻门爪哇栅藻、四尾栅藻、盘星藻、空星藻等其他有益藻种类及数量逐渐升高, 表明沉水植物的存在可有效减少养殖水体中有害藻类的产生, 促进有益藻类的生长。结合 Shannon-Wiener 多样性指数发现, 实验组浮游藻类生物多样性指数明显升高, 而且金鱼藻提高浮游藻类生物多样性能力是篦齿眼子菜的 1.96 倍, 说明金鱼藻和篦齿眼子菜可以明显的增加物种的丰富度, 同时可提高水体的清洁度(韩欢欢, 2012)。董淮晋等(2013)研究也表明, 轮藻和金鱼藻组合能有效改善水体透明度, 增加浮游藻类多样性, 控制生物量。本研究表明, 在养殖水体中适量放入金鱼藻、篦齿眼子菜等沉水植物对保持水体健康、水质清洁及保证养殖生物的安全性具有实际意义。

参 考 文 献

- Chang MY, Li CL, Dong J, *et al.* Dynamic changes of phytoplankton composition during cyanobacteria blooms in aquaculture ponds. *Progress in Fishery Sciences*, 2019, 40(1): 36–45 [常孟阳, 李晨露, 董静, 等. 蓝藻水华暴发期间养殖池塘浮游藻类动态变化. *渔业科学进展*, 2019, 40(1): 36–45]
- Chen DH, Liu YD, Song LR. The allelopathy of macrophyte *Potamogeton pectinatus* L on chlorophyta (*Scenedesmus obliquus*) and cyanobacteria (*Microcystis aeruginosa*) and calculation of allelopathic parameter. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2004, 28(2): 163–168 [陈德辉, 刘永定, 宋立荣. 篦齿眼子菜对栅藻和微囊藻的他感作用及其参数. *水生生物学报*, 2004, 28(2): 163–168]
- Dong HJ, He LS, Huang CH, *et al.* Using submersed plants *Chara* sp. and *Ceratophyllum demersum* to control eutrophication in Baiyangdian Lake. *Wetland Science*, 2013, 11(4): 505–509 [董淮晋, 何连生, 黄彩红, 等. 利用轮藻和金鱼藻组合治理白洋淀富营养化水体研究. *湿地科学*, 2013, 11(4): 505–509]
- Dong J, Gao YN, Chang MY, *et al.* Colony formation by the green alga *Chlorella vulgaris* in response to the competitor *Ceratophyllum demersum*. *Hydrobiologia*, 2018, 805(1): 177–187
- Han HH. Preliminary studies on algae diversity and environmental correlation in Anxing wetland from Heilongjiang Province. Master's Thesis of Harbin Normal University, 2012, 30–40 [韩欢欢. 黑龙江省安兴湿地藻类植物多样性及其环境相关性初步研究. 哈尔滨师范大学硕士研究生学位论文, 2012, 30–40]
- Han TT, Qi ZH, Huang HH, *et al.* Effects of enrichment with three nitrogen sources on growth and biochemical composition of *Sargassum hemiphyllum* seedlings. *Progress in Fishery Sciences*, 2018, 39(4): 159–166 [韩婷婷, 齐占会, 黄洪辉, 等. 3种氮源加富对半叶马尾藻幼苗生长和生化组成的影响. *渔业科学进展*, 2018, 39(4): 159–166]
- He ZX, Zhang TY. The mathematical model analysis of *Ceratophyllum demersum* L. co-cultured with *Microcystis aeruginosa*. *Journal of Hygiene Research*, 2016, 45(5): 834–839 [何宗祥, 张庭廷. 金鱼藻与铜绿微囊藻共生时的数学模型分析. *卫生研究*, 2016, 45(5): 834–839]
- Hilt S, Gross EM. Can allelopathically active submerged macrophytes stabilize clear-water states in shallow lakes? *Basic and Applied Ecology*, 2008, 9(4): 422–432
- Hu JY, Li YY, Wei YX, *et al.* Chinese freshwater algae. Beijing: Science Press, 2006, 23–201, 303–412, 496–903 [胡鸿钧, 李尧英, 魏印心, 等. 中国淡水藻类. 北京: 科学出版社, 2006, 23–201, 303–412, 496–903]
- Jiang XX, Yang PY, Wang JY, *et al.* Effects of *Daphnia magna* and *Ceratophyllum demersum* on the growth of three microalgae. *Freshwater Fisheries*, 2018, 48(4): 106–112 [姜小玉, 杨佩昀, 王洁玉, 等. 大型溞和金鱼藻对三种微藻增殖的影响. *淡水渔业*, 2018, 48(4): 106–112]
- Ju YL, Li XM. Allelopathic effects of three submerged macrophytes in the Nansi Lake on *Microcystis aeruginosa*. *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]
- Lei YZ. Aquaculture water environment chemistry experiment. Beijing: China Agriculture Press, 2006, 49–85 [雷衍之. 养殖水环境化学实验. 北京: 中国农业出版社, 2006, 49–85]
- Lichtenthaler HK, Buschmann C. Chlorophylls and carotenoids: Measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*, 2001(s1), F4.3.1–F4.3.8
- Liu J, Zhang QD, Ma YY, *et al.* Purification effect on nutrient source by *Ceratophyllum demersum* in eutrophic water.

- Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2012, 25(1): 257–260 [刘俊, 张清东, 马芸莹, 等. 金鱼藻对富营养化水体营养源的净化作用. 西南农业学报, 2012, 25(1): 257–260]
- Nakai S, Zou G, Okuda T, *et al.* Polyphenols and fatty acids responsible for anti-cyanobacterial allelopathic effects of submerged macrophyte *Myriophyllum spicatum*. Water Science and Technology, 2012, 66(5): 993–999
- Rastogi RP, Sinha RP, Incharoensakdi A. The cyanotoxin-microcystins: Current overview. Reviews in Environmental Science and Biotechnology, 2014, 13(2): 215–249
- Shannon CE, Weaver W. The mathematical theory of communication. Urbana IL: University of Illinois Press, 1949, 296
- Shen MM, Li J, Wang QY, *et al.* Analysis of the microalgae community in industrial aquaculture ponds of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). Progress in Fishery Sciences, 2017, 38(5): 64–72 [沈明明, 李健, 王清印, 等. 凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)工厂化养殖系统微藻的群落特征分析. 渔业科学进展, 2017, 38(5): 64–72]
- Sun YY, Xu SZ, Zhang J, *et al.* Growth inhibition of *Ceratophyllum demersum* on five species of water bloom microalgae. Environmental Science and Technology, 2012, 35(7): 1–7 [孙颖颖, 徐深圳, 张静, 等. 金鱼藻对 5 种水华微藻生长的抑制作用. 环境科学与技术, 2012, 35(7): 1–7]
- Wang HP, Liu F, Luo P, *et al.* Allelopathic effects of *Myriophyllum aquaticum* on two cyanobacteria of *Anabaena flosaquae* and *Microcystis aeruginosa*. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2017, 98(4): 556–561
- Wei FS, *et al.* Water and wastewater monitoring and analysis method (fourth edition). Beijing: China Environmental Science Press, 2002, 670–671 [魏复盛, 等. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002, 670–671]
- Wu R, Cui LF, Jiang LW, *et al.* The effects of *Ceratophyllum* and *Myriophyllum* on the production and release of cyanotoxins in *Microcystis aeruginosa*. Journal of Hydroecology, 2010, 3(3): 43–46 [吴溶, 崔莉芬, 蒋凌炜, 等. 金鱼藻和狐尾藻对铜绿微囊藻生长及藻毒素释放的影响. 水生生态学杂志, 2010, 3(3): 43–46]
- Xian QM, Chen HD, Zou HX, *et al.* Allelopathic effects of four submerged macrophytes on *Microcystis aeruginosa*. Journal of Lake Sciences, 2005, 17(1): 75–80 [鲜启鸣, 陈海东, 邹惠仙, 等. 四种沉水植物的克藻效应. 湖泊科学, 2005, 17(1): 75–80]
- Xiao X, Lou LP, Li H, *et al.* Algae control ability of allelopathically active submerged macrophytes. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(3): 705–712 [肖溪, 楼莉萍, 李华, 等. 沉水植物化感作用控藻能力评述. 应用生态学报, 2009, 20(3): 705–712]
- Xing CY, Wu YG, Qiao JD, *et al.* Studies on allelopathic inhibition of aquatic plant communities to algal bloom. Environmental Science and Technology, 2018, 41(3): 35–41 [邢春玉, 吴运刚, 乔镜澄, 等. 水生植物群落对水华藻类的化感抑制研究. 环境科学与技术, 2018, 41(3): 35–41]
- Xing XM, Qu C, Zhi Q, *et al.* Study of the in-situ repair on polluted water by aquatic plants. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science), 2018, 35(1): 84–87, 93 [邢秀敏, 曲超, 支青, 等. 水生植物组合对受污水体的原位修复研究. 河北工程大学学报(自然科学版), 2018, 35(1): 84–87, 93]
- Xu J, Li XL, Chen HD, *et al.* Study on allelochemicals in *Ceratophyllum demersum*. Environmental Pollution and Control, 2008, 30(1): 28–32 [徐洁, 李小路, 陈海东, 等. 金鱼藻中抑藻化感物质的研究. 环境污染与防治, 2008, 30(1): 28–32]
- Yang L, Wu W, Hu GD, *et al.* Allelopathic effect of water extracts from two submerged macrophytes on growth of *Scenedesmus obliquus*. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(4): 1530–1535 [杨琳, 吴伟, 胡庚东, 等. 两种沉水植物浸提液对斜生栅藻的化感效应. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1530–1535]
- Yao Y, He F, Hu SH, *et al.* Effects of allelopathy of submerged macrophytes on the phytoplankton community collected from the west part of the West Lake wetland in Hangzhou, China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(4): 971–978 [姚远, 贺锋, 胡胜华, 等. 沉水植物化感作用对西湖湿地浮游植物群落的影响. 生态学报, 2016, 36(4): 971–978]
- Zhang F, Xie JZ. Study on the removal capacity of *Potamogeton pectinatus* to nitrogen and phosphorus in water. Journal of Agricultural University of Hebei, 2012, 35(4): 19–24 [张帆, 谢建治. 篦齿眼子菜对水体氮、磷去除效果的研究. 河北农业大学学报, 2012, 35(4): 19–24]
- Zhang ZH, Li W, Wu XF. Allelopathic effect of six submerged macrophytes on algae growth in eutrophied water. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2017, 39(2): 55–60 [张之浩, 李威, 吴晓芙. 6 种沉水植物对富营养化水体化感抑藻效果研究. 湘潭大学自然科学学报, 2017, 39(2): 55–60]
- Zhao W. Aquatic biology. Beijing: China Agriculture Press, 2005, 502–507 [赵文. 水生生物学. 北京: 中国农业出版社, 2005, 502–507]
- Zheng YH, Zhong YX. Inhibition effects of *Ceratophyllum demersum* on 5 kinds of eutrophic algae. Proceedings of the 2007 China Sustainable Development Forum and China Sustainable Development Academic Conference, 2007, 369–372 [郑耀辉, 钟云霄. 金鱼藻对五种富营养化藻类的抑藻效应. 2007 中国可持续发展论坛暨中国可持续发展学术年会论文集(4), 2007, 369–372]
- Zhu JY, Liu BY, Wang J, *et al.* Study on the mechanism of allelopathic influence on cyanobacteria and chlorophytes by submerged macrophyte (*Myriophyllum spicatum*) and its secretion. Aquatic Toxicology, 2010, 98(2): 196–203
- Zou H, Deng JX, Zhu Y. Application of plant allelopathy in

controlling of algae bloom. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2012, 31(2): 28–34 [邹华, 邓继选, 朱银. 植物化感作用在控制水华藻类中的应用. *食品与生物技术学报*, 2012, 31(2): 28–34]

Zuo SP, Fang ZS, Yang SY, *et al.* Effect of allelopathic potential from selected aquatic macrophytes on algal interaction in the polluted water. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2015, 61: 133–138

(编辑 陈 辉)

Responses of Eutrophic Ponds to *Ceratophyllum demersum* and *Potamogeton pectinatus*

LI Chenlu, CHANG Mengyang, DONG Jing^①, DAI Dujuan, WANG Jiahui,
SHANG Xiangyang, FAN Congli
(College of Fisheries, Henan Normal University, Xinxiang 453007)

Abstract Cyanobacterial blooms occur frequently in aquaculture ponds during summer, which has brought great losses to the aquaculture industry. Physical salvage and chemical reagents were previously used to kill the harmful algae and improve the water quality. However, physical salvage is time-consuming, and chemical reagents easily cause more pollution. Thus, there is currently greater consideration to regulate the water quality by using ecological strategies, such as the inhibition of cyanobacteria by submerged macrophytes. Because of its ecological safety, this method is being increasingly applied in eutrophic water bodies. In the present study, coculture simulation experiments were used to observe the effects of submerged plants (*Ceratophyllum demersum* and *Potamogeton pectinatus*) on the phytoplankton composition and water quality of ponds (i.e., the concentrations of total nitrogen, total phosphorus, soluble nitrogen, soluble phosphorus, nitrate, and ammonia, and chemical oxygen demand) during cyanobacterial blooms. The results showed that when compared with the control, *C. demersum* and *P. pectinatus* could significantly reduce the concentrations of nitrogen and phosphorus in the water column, with significant differences detected between the control and *P. pectinatus* treatment; inhibit the growth of cyanobacteria, especially of *Oscillatoria* sp. and *Microcystis* sp., with the effects of *P. pectinatus* being greater than those of *C. demersum* (compared with the values in the control pond, the algal density, biomass, and Chl.a content decreased by 93.6%, 98.9%, and 60.5%, respectively, in the *P. pectinatus*-treated pond and by 72.5%, 86.8%, and 54.3%, respectively, in the *C. demersum*-treated pond); and promote the phytoplankton biodiversity of the ponds. At the end of the experimentation, the biodiversity in the ponds treated with *C. demersum* and *P. pectinatus* increased by 98.4% and 50.3%, respectively, relative to that in the control pond. The results of this study provide a theoretical basis for the future restoration and remediation of eutrophic waters.

Key words *Ceratophyllum demersum*; *Potamogeton pectinatus*; Algae; Aquaculture ponds; Blooms

① Corresponding author: DONG Jing, E-mail: happydj111@163.com