DOI:10.15928/j.1674-3075.2015.05.013

复合养殖系统中浮游植物群落结构及其与水环境因子的关系

王 璐[1],李 冰[2],孙盛明[2],王 林[1],张明明[1],朱 健[1,2]

(1. 南京农业大学无锡渔业学院,江苏 无锡 214081;
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)

摘要:以主养团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)搭配少量鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙(*Aristichthy nobilis*)的人工湿地-池塘复合养殖系统为研究对象,2014年8-11月在人工湿地运行期间调查了该复合养殖系统池塘中浮游植物的生态特征,并通过冗余分析(RDA)方法探究了浮游植物群落结构与水环境因子的关系。结果表明,复合养殖池塘中共鉴定出硅藻(Bacillariophyta)、绿藻(Chlorophyta)、蓝藻(Cyanophyta)、隐藻(Cryptophyta)、裸藻(Euglenophyta)、金藻(Chrysophyta)、黄藻(Xanthophyta)、甲藻(Pyrrophyta)共8门、91种(包括变种和变型),其中绿藻种类最多,共53种,占浮游植物总种类数的58.24%;而蓝藻密度占绝对优势,占浮游植物总密度的79.82%。人工湿地运行期间养殖池塘中浮游植物的种类、密度、生物量无显著变化,其密度变化范围为1.09×10^9~1.83×10^9个/L,均值为1.52×10^9个/L;生物量变化范围为8.76~11.03 mg/L,均值为9.80 mg/L;浮游植物主要优势种共计10种,包括绿藻门的双对栅藻(*Scenedesmus bijuga*)、四足十字藻(*Crucigenia tetrapedia*)、苇氏藻(*Westella botryoides*),蓝藻门的微小平裂藻(*Merismopedia tenuissima*)、点形粘球藻(*Gloeocapsa punctata*)、泥污颤藻(*Oscillatoria limosa*)、优美平裂藻(*Merismopedia elegans*)、微小色球藻(*Chroococcus minutus*)、为首螺旋藻(*Spirulina princeps*)、不定微囊藻(*Microcystis incerta*);池塘浮游植物的Shannon-Wiener多样性指数为2.77~3.27,Margalef多样性指数为2.75~3.18,Pielou均匀性指数为0.45~0.55。浮游植物种类丰度与水环境因子的冗余度分析(RDA)结果表明,池塘中浮游植物种类丰度受到多个环境因子的影响,其中小球藻(*Chlorella vulgaris*)和四足十字藻等绿藻主要受温度、溶氧、pH的影响,而微小平裂藻和点形粘球藻等蓝藻主要受pH和氨氮的影响。

关键词:复合养殖池塘;浮游植物;环境因子;冗余分析

中图分类号:Q142 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2015)05-0081-08

以团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)为主养对象,辅养鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙(*Aristichthy nobilis*)是华东地区常见的一种养殖模式,伴随集约化水产养殖模式的迅猛发展,养殖密度的提高、饲料过分投入、池塘水质恶化等诸多问题导致养殖动物病害频发,同时养殖废水未经处理便直接对外排放,严重污染了周围水体的生态环境(Masood,1997);而人工湿地-池塘复合养殖系统的主要过程是将养殖废水通过一定途径到达人工湿地,经人工湿地过滤、净化过的水再进入池塘,池塘水在人工湿地-池塘复合养殖系统中循环,可充分利用营养物质,改善水体环境,提高养殖效益和生态效益(Sindilariu et al,2007)。目前,已有一些人工湿地-池塘复合养殖系统的相关研究,包括复合湿地-池塘养殖系统处理水体中的氮磷、悬浮物和有机物(陈家长等,2007;朱自干等,2009;戴习林等,2014;董玉峰,2014)以及微生物多样性研究(姚延丹等,2011;刘志伟等,2014;雷旭等,2015);但关于复合养殖系统中浮游植物的研究却鲜有报导(高云霓等,2007;朱晓荣等,2014)。

浮游植物对水质非常敏感,水质营养状况不同,浮游植物的群落结构也存在差异,因此浮游植物是衡量水体生态系统健康与否的重要指示生物(江源等,2013;Sanna et al,2006)。研究表明,浮游植物密度、种类组成和水环境因子的变化密切相关(薄芳芳等,2009;李然然等,2014);因此本研究将人工湿地和养殖池塘相连接,以人工湿地-池塘复合养殖系统中的池塘为研究对象,探究浮游植物的种类组成、密度、生物量、多样性及其与水环境因子的关系,以期为优化池塘养殖生态环境提供理论依据。

收稿日期:2015-05-30

基金项目:"十二·五"国家科技支撑计划项目(2012BAD25B07);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2015JBFM24);国家大宗淡水鱼类产业技术体系项目(nyeytx-46)。

作者简介:王璐,1991年生,女,硕士研究生,主要从事水产健康养殖工作。E-mail:wl1036880676@163.com

通信作者:朱健,男,研究员,主要从事水产健康养殖研究。E-mail:zhuj@ffrc.cn

1 材料与方法

1.1 试验设计

在江苏省宜兴市淡水渔业研究中心大浦试验基地,选取人工湿地-池塘复合养殖系统,其中人工湿地面积0.045 hm^2,池塘面积0.33 hm^2。池塘养殖模式为主养团头鲂兼养其它鱼类的混合养殖,放养团头鲂鱼种33 000尾/hm^2,混养鲢3 750尾/hm^2、鳙900尾/hm^2、异育银鲫(*Carassius auratus gibelio*)3 750尾/hm^2、草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)150尾/hm^2。鱼类放养比例及规格见表1。池塘饵料投入以人工配合饲料为主,按鱼体重的3%~5%投喂,每日投喂4次,时间为8:00、11:00、14:00和17:00。

表1 池塘鱼类放养规格及密度

Tab.1 Fish size and stocking density in the pond

品种	规格/g	放养密度/尾·hm^{-2}
团头鲂	80~90	33 000
异育银鲫	60~70	3 750
鲢	160~170	3 750
鳙	120~130	900
草鱼	60~70	150

1.2 水质测定

人工湿地从2014年7月开始运行,12月对湿地植物进行收割,因此本研究选取2014年8-11月对人工湿地处理下团头鲂主养池塘进行调查。养殖池塘中设置3个采样点,在每月下旬进行采样,时间为10:00-11:00。采集的水样用便携式冷藏箱保存,及时送回实验室检测分析。

测定的水质理化参数包括水温(T)、pH、溶氧(DO)、总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH_3-N)、亚硝态氮(NO_2^--N)。水温(T)和pH采用梅特勒-托利多pH计现场测定;溶氧(DO)采用YSI-550A型便携式溶氧仪现场测定;总氮(TN)采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定;总磷(TP)采用过硫酸钾消解-氯化亚锡还原光度法测定;氨氮(NH_3-N)采用纳氏试剂比色法测定;亚硝态氮(NO_2^--N)采用N-(1-萘基)-乙二胺光度法测定(国家环境保护总局,2002)。

1.3 浮游植物采集与计数

浮游植物样品的采集与分析参考章宗涉和黄祥飞(1991)。浮游植物与水质样品同时进行采集。浮游植物的定性样品用25号浮游生物网采集,在水深0.5 m处呈"∞"型缓慢拖拉1~3 min,带回实验室进行分类。定量样品用1 L有机玻璃采水器在水深0.5 m处采集水样1 L,现场加入15 mL鲁哥试剂并摇匀,带回实验室静置沉淀24 h后浓缩并定容至50 mL。浮游植物的定性样品和定量样品均在10×40倍光学显微镜下用0.1 mL计数框进行分类计数。定量样品每个计数2次,每次计数50~100个视野,2次误差小于±15%有效,否则进行第3次计数,取相近2次的平均值。浮游植物分类参照韩茂森和束蕴芳(1995)。

1.4 数据分析

1.4.1 浮游植物多样性指数 根据浮游植物的Mcnaughton优势度指数(Y)、Shannon-Wiener多样性指数(H')、Margalef多样性指数(D)、Pielou均匀度指数(J)对浮游植物的生态学特征进行分析评价。各项指数的计算公式如下:

$$Y=\frac{n_i}{N}\times f_i$$

$$H'=-\sum_{i=1}^{S}P_i\log P_i;\ Pi=\frac{n_i}{N}$$

$$D=\frac{S-1}{\ln N}$$

$$J=\frac{H'}{\log_2 S}$$

式中:n_i为第i种的个数;N为浮游植物总个数;f_i为第i种出现的频率;S为浮游植物总种数;优势度>0.02的浮游植物定为优势种。

1.4.2 冗余度分析(RDA) 通过软件Canoco 4.5 for Windows对浮游植物进行除趋势对应分析(DCA),当排序轴最长梯度<3时,选择冗余度分析(RDA);>3时选择典范对应分析(CCA);养殖池塘中浮游植物的DCA排序轴最大梯度长为0.453,因此选择RDA分析浮游植物种类丰度与水环境因子的关系。分析前对浮游植物进行筛选,筛选条件为在各样点的出现频度>12.5%和至少在1个样点的相对密度≥1%,分析过程中数据均经过$y=\ln(x+1)$转换(Muylaert et al, 2000; Lopes et al, 2005)。

2 结果与分析

2.1 水质理化指标

2014年8-11月人工湿地运行期间,与人工湿地相连的养殖池塘的环境因子见表2。养殖池塘的水温在11.51~24.73℃,pH值7.65~8.12,溶氧为2.93~8.90 mg/L,总氮为10.00~16.32 mg/L,总磷为0.51~0.88 mg/L,氨氮为0.44~0.55 mg/L,

亚硝酸氮为 0.07 ~ 0.40 mg/L,氮磷比为 11.68 ~ 28.90。

2.2　浮游植物种类与组成

人工湿地运行期间,共鉴定出浮游植物 8 门、91 种;其中绿藻门 53 种,占 58.24%;蓝藻门 17 种,硅藻门 7 种,裸藻门 8 种,隐藻门 3 种,甲藻门、黄藻门、金藻门种类较少,共 3 种。蓝藻密度占绝对优势,占浮游植物总密度的 79.82%,绿藻占 17.17%,硅藻为 1.34%,其他门类浮游植物的密度很低,合计占比仅 1.67%。图 1 可见,在整个试验运行期间,养殖池塘中浮游植物的种类组成和密度无明显变化,群落结构较为稳定。

表 2　养殖池塘的理化指标

Tab. 2　Physicochemical parameters of the water body in the aquaculture pond

理化指标	8 月	9 月	10 月	11 月
T/℃	24.73 ± 0.36	23.89 ± 0.37	20.81 ± 1.20	11.51 ± 0.69
pH	7.80 ± 0.05	7.70 ± 0.13	7.65 ± 0.06	8.12 ± 0.10
DO/mg · L^{-1}	2.93 ± 1.21	3.69 ± 0.29	4.93 ± 1.13	8.90 ± 1.19
TN/mg · L^{-1}	13.71 ± 0.73	16.32 ± 0.35	10.78 ± 0.04	10.00 ± 0.23
TP/mg · L^{-1}	0.51 ± 0.16	0.57 ± 0.03	0.77 ± 0.03	0.88 ± 0.19
NH_3-N/mg · L^{-1}	0.55 ± 0.02	0.44 ± 0.03	0.44 ± 0.04	0.46 ± 0.02
NO_2^--N/mg · L^{-1}	0.24 ± 0.01	0.17 ± 0.01	0.40 ± 0.02	0.07 ± 0.00
N : P	28.20 ± 7.06	28.90 ± 2.09	13.93 ± 0.46	11.68 ± 2.25

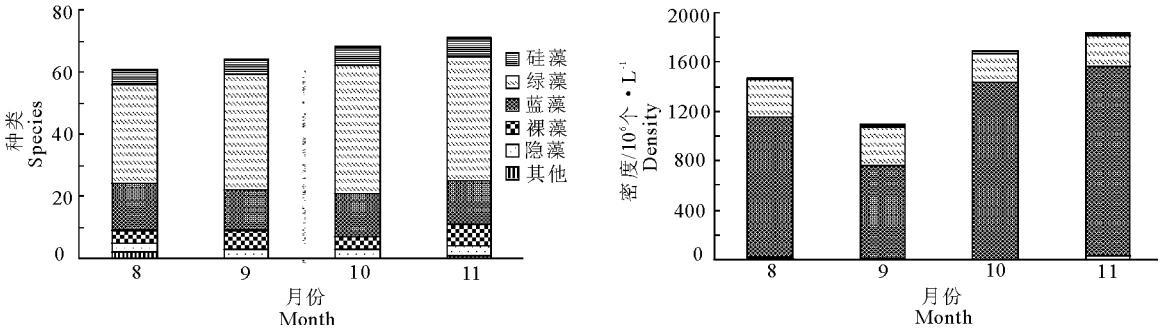

图 1　浮游植物种类组成和密度变化

Fig. 1　Species composition and density variation of phytoplankton community

2.3　浮游植物密度与生物量

图 2 显示了复合养殖池塘浮游植物密度和生物量随时间的变化情况。人工湿地运行期间,养殖池塘中浮游植物密度和生物量平均值分别为 1.52×10^9 个/L 和 9.80 mg/L。浮游植物密度在 11 月最高,为 1.83×10^9 个/L,而生物量在 8 月最高,为 11.03 mg/L;密度和生物量最低值均出现在 9 月,分别为 1.09×10^9 个/L 和 8.76 mg/L。这可能是因为 9 月渔场地区降雨频繁,池塘中浮游植物的密度和生物量下降所致。

2.4　浮游植物优势种与优势度

根据优势度计算法则,人工湿地运行期间共鉴定出优势种 10 种(表 3)。包括绿藻门的双对栅藻(*Scenedesmus bijuga*)、四足十字藻(*Crucigenia tetrapedia*)、苇氏藻(*Westella botryoides*),蓝藻门的微小平裂藻(*Merismopedia tenuissima*)、点形粘球藻(*Gloeocapsa punctata*)、泥污颤藻(*Oscillatoria limosa*)、优美平裂藻(*Merismopedia elegans*)、微小色球藻(*Chroococcus minutus*)、为首螺旋藻(*Spirulina princeps*)、不定微囊藻(*Microcystis incerta*);其中微小平裂藻的优势度在 0.24 ~ 0.37,说明养殖池塘中微小平裂藻数量较多,优势明显。

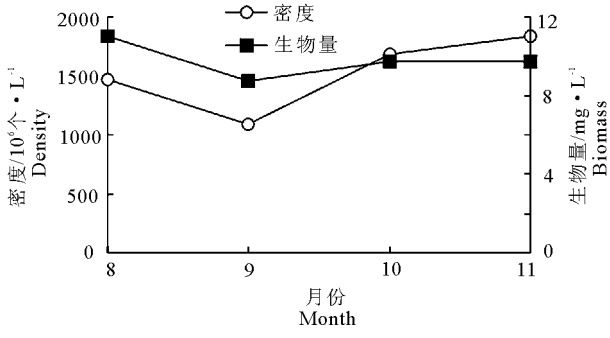

图 2　养殖池塘中浮游植物密度和生物量变化

Fig. 2　Monthly changes of phytoplankton density and biomass in the aquaculture pond

表3 养殖池塘中浮游植物的优势种及优势度

Tab.3 Phytoplankton dominant species and their corresponding dominance in the aquaculture pond

8月		9月		10月		11月	
优势种	优势度	优势种	优势度	优势种	优势度	优势种	优势度
微小平裂藻	0.33	微小平裂藻	0.37	泥污颤藻	0.28	点形粘球藻	0.43
点形粘球藻	0.24	四足十字藻	0.18	微小平裂藻	0.24	微小平裂藻	0.28
四足十字藻	0.10	泥污颤藻	0.09	点形粘球藻	0.12	不定微囊藻	0.04
泥污颤藻	0.07	微小色球藻	0.06	不定微囊藻	0.11	泥污颤藻	0.04
微小色球藻	0.06	优美平裂藻	0.06	优美平裂藻	0.05	四足十字藻	0.04
为首螺旋藻	0.03	点形粘球藻	0.05	四足十字藻	0.05	苇氏藻	0.02
双对栅藻	0.03	不定微囊藻	0.04	微小色球藻	0.04		
		双对栅藻	0.03				

2.5 浮游植物多样性

多样性指数是判断水体营养状态的常用指标，指数值越大，浮游植物的群落结构越复杂，稳定性越高，水质越好。如图3所示，在人工湿地运行期间，养殖池塘中浮游植物的Shannon-Wiener多样性指数为2.77~3.27，Margalef多样性指数为2.75~3.18，Pielou均匀性指数为0.45~0.55。

8-10月，养殖池塘中浮游植物的Shannon-Wiener多样性指数和Pielou均匀性指数变化较为平缓；随着温度的降低，11月的Shannon-Wiener多样性指数和Pielou均匀性指数均有所下降，而Margalef多样性指数呈缓慢上升趋势。三者的数值均较高，说明养殖池塘中浮游植物群落结构较复杂、稳定性较好。

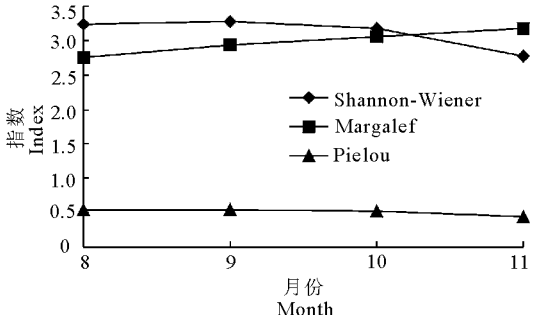

图3 养殖池塘浮游植物多样性指数变化

Fig.3 Changes of phytoplankton diversity indices in the aquaculture pond

2.6 浮游植物种类丰度与环境因子的关系

根据人工湿地运行期间获得的浮游植物出现频度和相对密度，选取了14种浮游植物用于RDA分析，浮游植物代码见表4。

表4 RDA分析中浮游植物的种类代码

Tab.4 Phytoplankton species codes for redundancy analysis (RDA)

代码	种　类	代码	种　类
s1	小球藻(*Chlorella vulgaris*)	s8	微小平裂藻(*Merismopedia tenuissima*)
s2	双对栅藻(*Scenedesmus bijuga*)	s9	优美平裂藻(*Merismopedia elegans*)
s3	四足十字藻(*Crucigenia tetrapedia*)	s10	微小色球藻(*Chroococcus minutus*)
s4	集星藻(*Actinastrum hantzschii*)	s11	为首螺旋藻(*Spirulina princes*)
s5	苇氏藻(*Westella botryoides*)	s12	具缘微囊藻(*Microcystis marginata*)
s6	美丽颤藻(*Oscillatoria formosa*)	s13	不定微囊藻(*Microcystis incerta*)
s7	泥污颤藻(*Oscillatoria limosa*)	s14	点形粘球藻(*Gloeocapsa punctata*)

人工湿地运行期间，养殖池塘浮游植物种类丰度与环境因子关系的RDA排序结果如图4所示。前2个轴的特征值分别为0.714和0.194，共解释了90.08%的变量。在RDA排序图中，环境因子箭头的长度反映了其与浮游植物物种的相关性强弱，某浮游植物种类与环境因子的垂直线在环境因子上的交点离箭头越近，表明其与该环境因子的正相关性越大，处于另一端则表示其与该环境因子的负相关性越大(石晓丹等，2008)。如表5和图4所示，在8个环境因子中，氨氮与轴1的相关系数最高($r=0.849$)，其次为pH值($r=0.361$)，总磷则与轴1呈负相关($r=-0.290$)。溶氧与轴2的相关性系数最高($r=0.928$)，其次为pH($r=0.791$)，温度、总氮和氮磷比则与轴2呈负相关($r=-0.988$、-0.808、-0.792)。

池塘中浮游植物种类丰度受到多个环境因子的影响，其中大多数绿藻主要受温度、溶氧、pH的影响，而大多数蓝藻主要受pH和氨氮的影响。小球藻和苇氏藻主要受溶氧和pH的影响；微小平裂藻和点形粘球藻与pH呈显著正相关；双对栅藻、美丽颤藻、为首螺旋藻主要受氨氮、总氮和氮磷比的影响；四足十字藻则主要受温度的影响，说明其适合在

较高的温度中生长;集星藻和泥污颤藻主要受亚硝酸氮的影响。

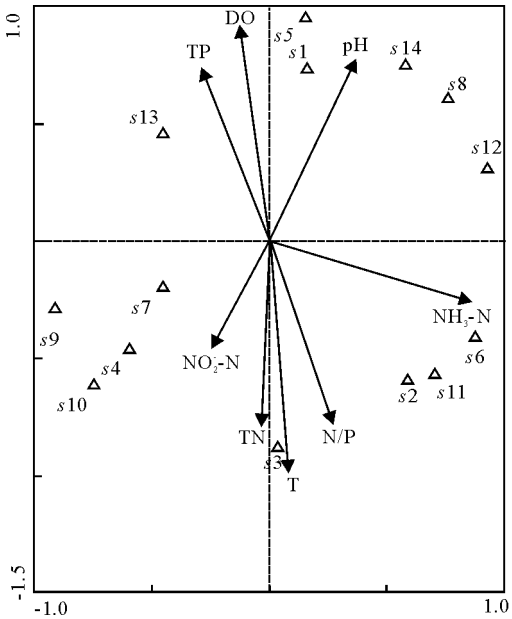

图 4　浮游植物与水环境因子 RDA 排序

Fig. 4　RDA biplot of phytoplankton species and water environmental factors

3　讨论

3.1　养殖池塘中浮游植物的生态特征

李瑞娇等(2014)对主养草鱼池塘中浮游植物群落结构的研究表明,池塘中绿藻种类最多,以蓝藻、隐藻和绿藻密度较高;武秀国等(2015)认为鲫养殖池塘中的蓝藻和绿藻为常见种与优势种,数量上以蓝藻为主。本研究中,主养团头鲂池塘浮游植物群落也以绿藻门的种类最多,数量上则是蓝藻居多,绿藻次之,说明鱼类养殖池塘中浮游植物的组成较为相近,均以蓝藻和绿藻为主。高云霓等(2007)研究发现,人工湿地与养殖池塘构成的复合养殖系统对养殖水体中浮游植物有较好的调控作用,在其整个实验期间池塘内浮游植物的种类、密度以及生物量无显著变化,保持相对稳定的群落结构;与本研究结果相吻合。本研究养殖池塘中浮游植物的 Shannon-Wiener 多样性指数为 2.77 ~ 3.27,Margalef 多样性指数为 2.75 ~ 3.18,Pielou 均匀性指数为 0.45 ~ 0.55,表明池塘中浮游植物的多样性较好、群落结构较为稳定;与吴恢碧等(2008)和杨慧君等(2010)的研究结果一致。说明循环水系统能够改善浮游植物群落组成,提高浮游植物的多样性指数,养殖用水不断地进行循环处理,能使其水质接近于自然水体,实现了水资源的高效利用,有效降低了鱼类的发病率,提高了鱼类品质,有助于实现水产养殖业可持续健康发展。

表 5　前 2 个 RDA 排序轴与水环境因子间的相关系数

Tab. 5　Correlation coefficient of water environmental factors with the first two axes of RDA

指标	SP1	SP2	EN1	EN2	pH	T	DO	TP	TN	NH_3-N	NO_2^--N	N : P
SP1	1.000											
SP2	-0.010	1.000										
EN1	0.975	0.000	1.000									
EN2	0.000	0.998	0.000	1.000								
pH	0.361	0.791	0.370	0.793	1.000							
T	0.079	-0.988	0.081	-0.990	-0.800	1.000						
DO	-0.130	0.928	-0.133	0.930	0.713	-0.929	1.000					
TP	-0.290	0.750	-0.298	0.752	0.339	-0.755	0.733	1.000				
TN	-0.032	-0.808	-0.033	-0.810	-0.462	0.751	-0.697	-0.703	1.000			
NH_3-N	0.849	-0.265	0.871	-0.266	-0.053	0.364	-0.405	-0.409	0.113	1.000		
NO_2^--N	-0.249	-0.474	-0.255	-0.475	-0.726	0.506	-0.487	-0.115	-0.082	-0.034	1.000	
N : P	0.265	-0.792	0.272	-0.794	-0.356	0.780	-0.789	-0.922	0.865	0.407	-0.029	1.000

3.2　影响浮游植物丰度的主要环境因子

有研究表明,营养盐、温度、pH、溶氧等因素会对水体中的浮游植物产生影响,不同环境的主要影响因子各不相同,对浮游植物的影响也存在较大差异(况琪军和夏宜琤,1991;Wang et al,2011;柴毅等,2014)。俞秋佳等(2014)对夏秋季苏州河浮游植物的研究显示,除温度外,氮磷比是影响苏州河中浮游植物密度的主要环境因子;李思阳等(2013)研究表明,影响高州水库浮游植物的主要环境因子是氮磷营养盐,而温度、pH 与 COD_{Mn} 对其也有一定的影响;朱梦灵等(2014)对汉丰湖入湖支流中浮游植物群落结构特征的研究表明,影响浮游植物分布与密度的主要水质理化因子为水温、总氮和总磷;薄芳芳等(2009)对夏季上海公园水体中浮游植物群落的研究显示,影响隐藻、甲藻和硅藻生物量的主要环境因子为透明度和浮游动物生物量,而蓝藻、裸藻、绿藻则主要受氮磷营养盐浓度和溶解氧的影响。本

研究中,绿藻主要受温度、溶氧和 pH 的影响,而蓝藻主要受 pH 和氨氮的影响。

3.3 复合养殖池塘中浮游植物与环境因子的关系

RDA 分析表明,本次调查的 8 种环境因子中,除 NO_2^--N 外,其他因子均对池塘中的浮游植物种类丰度产生了较大的影响,包括 T、pH、DO、TN、TP、N∶P、NH_3-N。氮、磷被认为是影响浮游植物群落结构的重要环境因子(孟顺龙等;2012;Jan et al,2012)。

本研究结果也显示,氮、磷浓度和氮磷比是影响养殖池塘水体中浮游植物丰度的重要环境因子。有研究表明,N∶P=12 为浮游植物生长的最适条件,而氮限制(N∶P=3)和磷限制(N∶P=48)均会抑制浮游植物的生长(董娟等,2012)。本研究中,N∶P在 11.68~28.90,适合浮游植物的生长,池塘中较高的浮游植物密度和生物量说明本研究结果与前人研究一致。水体中的 NH_3-N 一般被浮游植物优先吸收,NO_2^--N 后吸收(刘峰等,2011);因此本研究中 NH_3-N 对浮游植物有较大影响,而 NO_2^--N 的影响有限。水温是影响浮游植物的主要环境因子,一般情况下浮游植物的密度随温度的升高而增加(刘艳,2011)。本研究中,11 月的温度下降,浮游植物密度反而有所上升,这可能是因为在不利环境下小型藻的适应能力比大型藻强,温度的骤降导致大型藻类如裸藻密度下降,而小型蓝藻尤其是点形粘球藻在竞争中占据优势,其密度反而上升;pH 是影响浮游植物生长繁殖的重要环境因子,对水体中的浮游植物丰度产生了一定的影响。蓝藻和绿藻易于在微碱性水体中占据优势(Agrawal, 2012);本研究中,池塘 pH 值在 7.65~8.12,偏向弱碱性,因此蓝藻和绿藻成为了养殖池塘中浮游植物的优势种。

综上所述,主养团头鲂的人工湿地-池塘复合养殖系统调查结果表明,浮游植物的种类、密度、生物量无显著变化、多样性指数较高、水质较为稳定;池塘中的大多数绿藻主要受温度、溶氧、pH 的影响,而大多数蓝藻主要受 pH 和氨氮的影响。关注水体中 pH 值和氨氮的变化,可防止蓝藻的爆发,同时也可提供健康的养殖环境。

参考文献

薄芳芳,杨虹,左倬,等. 2009. 上海公园水体夏季浮游植物群落与环境因子的关系[J]. 生态学杂志,28(7):259-1265.

柴毅,彭婷,郭坤,等. 2014. 海子湖春季浮游植物群落结构与环境因子相关性分析[J]. 水生态学杂志,35(2):56-62.

陈家长,何尧平,孟顺龙,等. 2007. 表面流人工湿地在池塘养殖循环经济模式中的净化效能研究[J]. 农业环境科学学报,26(5):1898-1904.

戴习林,鞠波,臧维玲,等. 2014. 罗氏沼虾池塘间歇运转人工湿地调控水质效果及其生长特征[J]. 上海海洋大学学报,23(5):680-689.

董娟,李大平,陶勇,等. 2012. 氮磷胁迫下藻-菌群落的变化研究[J]. 环境科学与技术,35(12):40-45,55.

董玉峰. 2014. 复合湿地净水效果的评价及优化技术的研究[D]. 上海:上海海洋大学.

高云霓,吴晓辉,邓平,等. 2007. 人工湿地-复合养殖系统中浮游藻类生态特征[J]. 农业环境科学学报,26(4):1230-1234.

国家环境保护总局. 2002. 水和废水监测分析方法(第4版)[M]. 北京:中国环境科学出版社.

韩茂森,束蕴芳. 1995. 中国淡水生物图谱[M]. 北京:海洋出版社.

江源,彭秋志,廖剑宇,等. 2013. 浮游藻类与河流生境关系研究进展与展望[J]. 资源科学,35(3):461-472.

况琪军,夏宜琤. 1991. 水体酸化对藻类影响的初步研究[J]. 环境科学学报,11(4):387-392.

雷旭,李冰,李晓,等. 2015. 复合垂直流人工湿地系统中不同植物根际微生物群落结构[J]. 生态学杂志,34(5):1373-1381.

李然然,章光新,张蕾. 2014. 查干湖湿地浮游植物与环境因子关系的多元分析[J]. 生态学报,34(10):2663-2673.

李瑞娇,吕元蛟,张念,等. 2014. 主养草鱼池塘的浮游植物群落结构及其环境影响因素研究[J]. 淡水渔业,44(2):77-82.

李思阳,韩志勇,许振成,等. 2013. 高州水库浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 水生态学杂志,34(5):16-24.

刘峰,高云芳,王立欣,等. 2011. 水域沉积物氮磷赋存形态和分布的研究进展[J]. 水生态学杂志,32(4):137-144.

刘艳. 2011. 额尔齐斯河及邻近内陆河流域浮游植物生态学研究[D]. 上海:上海海洋大学.

刘志伟,周美修,宋俊玲,等. 2014. 复合垂直流人工湿地污染物去除特征及微生物群落多样性分析[J]. 环境工程,(6):38-42.

孟顺龙,裘丽萍,胡庚东,等. 2012. 氮磷比对两种蓝藻生长及竞争的影响[J]. 农业环境科学学报,31(7):1438-1444.

石晓丹,阮晓红,邢雅囡,等. 2008. 苏州平原河网区浅水湖泊冬夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析

[J]. 环境科学,29(11):2999 – 3008.

吴恢碧,李谷,陶玲,等. 2008. 循环流水池塘养殖系统浮游植物群落结构与特征[J]. 华中农业大学学报,27(5):648 – 653.

武秀国,苏彦平,陈修报,等. 2015. 不同养殖类型池塘藻类群落特征[J]. 江苏农业科学,43(1):227 – 230.

杨慧君,谢从新,何绪刚,等. 2010. 循环水池塘与非循环水池塘中浮游生物的群落结构及其动态研究[J]. 淡水渔业,40(3):30 – 37.

姚延丹,李谷,陶玲,等. 2011. 复合人工湿地 – 池塘养殖生态系统细菌多样性研究[J]. 环境科学与技术,34(7):50 – 55.

俞秋佳,徐凤洁,蒋跃,等. 2014. 夏秋季苏州河浮游植物群落特征及其影响因子[J]. 生态与农村环境学报,30(4):450 – 457.

章宗涉,黄祥飞. 1991. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京:科学出版社.

朱梦灵,潘晓洁,郑志伟,等. 2014. 汉丰湖支流浮游植物群落结构及环境因子影响分析[J]. 水生态学杂志,35(6):46 – 52.

朱晓荣,顾建国,曹卢,等. 2014. 潜流湿地净化技术对池塘循环水养殖系统浮游植物群落变化的影响[J]. 水产养殖,35(4):21 – 28.

朱自干,李谷,吴恢碧,等. 2009. 复合池塘养殖系统湿地水质净化功能研究[J]. 淡水渔业,39(5):62 – 66.

Agrawal S C. 2012. Factors controlling induction of reproduction in algae-review: the text[J]. Folia Microbiol, 57(5):387 – 407.

Jan S R, Brian J Bennett, Donielle N Jordan, et al. 2012. Phosphorus regulates stream injury by filamentous green algae, DO, and pH with thresholds in responses[J]. Hydrobiologia, 695:25 – 42.

Lopes M R M, Bicudo C E M, Ferragut M C. 2005. Short term spatial and temporal variation of phytoplankton in a shallow tropical oligotrophic reservoir, southeast Brazil[J]. Hydrobiologia, 542:235 – 247.

Masood E. 1997. Aquaculture: A solution, or source of new problems[J]. Nature, 386:109.

Muylaert K, Sabbe K, Vyverman W. 2005. Spatial and temporal dynamics of phytoplankton communities in a freshwater tidal estuary (Schelde, Belgium)[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 50(5):673 – 687.

Sanna S, Marial L, Maija H. 2006. Long-term changes in summer phytoplankton communities of the open northern Baltic Sea[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 71(3 – 4):580 – 592.

Sindilariu P D, Carsten S, Reinhard R. 2007. Treatment of flow-through trout aquaculture effluents in a constructed wetland [J]. Aquaculture, 270:92 – 104.

Wang Z H, Yuan M L, Liang Y, et al. 2011. Effects of temperature and organic and inorganic nutrients on the growth of *Chattonella marina* (Raphidophyceae) from the Daya Bay, South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 30(3):124 – 131.

(责任编辑　万月华)

Phytoplankton Community Structure and Its Relationship to Water Quality Parameters in a Compound Aquaculture System

WANG Lu[1], LI Bing[2], SUN Sheng-ming[2], WANG Lin[1], ZHANG Ming-ming[2], ZHU Jian[1,2]

(1. WuXi Fisheries College Nanjing Agricultural University, Wuxi 214081, P. R. China;
2. Freshwater Fisheries Research Center, Key Laboratory of Freshwater Fisheries and Germplasm Resources Utilization, Ministry of Agriculture, Wuxi 214081, P. R. China)

Abstract: With the development of intensive aquaculture and high-density breeding, the excessive input of forage leads to the deterioration of pond water quality and disease outbreaks occur frequently in the cultured animals. Meanwhile, aquacultural wastewater was being discharged directly into the aquatic environment without treatment. A new, more ecological, culturing method, the integrated pond aquaculture-constructed wetland system, improves the quality of the products while conserving water resources and effectively treating the aquacultural wastewater. In this research, a modern integrated system was studied, consisting of a constructed wetland (0.045 hm^2) and a culture pond (0. 33 hm^2). In the system, *Megalobrama amblycephala* fingerlings (33 000 ind/hm^2) with a small number of *Hypophthalmichthys molitrix* (3 750 *ind/hm*^{2}), *Aristichthy nobilis* (900 ind/hm^2), *Carassius auratus gibelio* (3 750 ind/hm^2) and *Ctenopharyngodon idellus* (150 ind/hm^2) were mix-cultured in the pond. The wastewater was filtered and purified through the constructed wetland and recirculated back to the pond. The fingerlings were fed on an artificial diet four times daily. The constructed wetland began operation in July, 2014 and the wetland plants were harvested in December. From August to November 2014, we investigated the community structure of phytoplankton in the pond when the constructed wetland was fully functioning. The relationship between phytoplankton community structure and water quality parameters was analyzed by redundancy analysis (RDA). Three sample sites were selected in the culture pond and the water samples were collected near the end of each month for determination of water physicochemical parameters including T, pH, DO, TN, TP, NH_3-N and NO_2^--N. Phytoplankton samples for qualitative analysis were collected with a No. 25 plankton net. 1 L water samples for quantitative phytoplankton analysis were collected at 0. 5 m below the surface using a glass water sampler and 15 mL Lugol's solution was added. Then the sample was concentrated to 50 mL by settling for 24 h. The phytoplankton qualitative and quantitative analysis were both conducted under an optical microscope. A total of 91 phytoplankton species from 8 phyla were identified in the pond, including Bacillariophyta, Chlorophyta, Cyanophyta, Cryptophyta, Euglenophyta, Chrysophyta, Xanthophyta and Pyrrophyta. Among them, Chlorophyta (53 species) accounted for 58.24% of the total phytoplankton species, with absolute dominance, while the phytoplankton density was dominated by Cyanophyta, accounting for 79.82% of the total phytoplankton density. During the entire study, phytoplankton species composition, density and biomass of the phytoplankton community did not change significantly in the pond. The phytoplankton density varied from 1.09×10^9 cells/L to 1.83×10^9 cells/L with an average of 1.52×10^9 cells/L and the phytoplankton biomass ranged from 8.76 mg/L to 11.03 mg/L with an average of 9.80 mg/L. The phytoplankton community was dominated by ten species including *Scenedesmus bijuga*, *Crucigenia tetrapedia*, *Westella botryoides* from Chlorophyta, and *Merismopedia tenuissima*, *Gloeocapsa punctata*, *Oscillatoria limosa*, *Merismopedia elegans*, *Chroococcus minutus*, *Spirulina princeps*, *Microcystis incerta* from Cyanophyta. The Shannon-Wiener diversity index, Margalef richness index and Pielou evenness index of the phytoplankton community were in the range of 2.77 – 3.27, 2.75 – 3.18, and 0.45 – 0.55, respectively, indicating that the phytoplankton community structure in the pond was very stable. Redundancy analysis shows that phytoplankton density in the pond was closely related with several environmental variables. *Chlorella vulgaris*, *Crucigenia tetrapedia* from Chlorophyta were mainly affected by temperature, dissolved oxygen, and pH, while *Merismopedia tenuissima*, *Gloeocapsa punctata* in Cyanophyta were mainly affected by pH and ammonia nitrogen.

Key words: integrated aquaculture pond; phytoplankton; environmental factors; redundancy analysis