

DOI:10.19663/j.issn2095-9869.20171227002

http://www.yykxjz.cn/

常孟阳, 李晨露, 董静, 尚向阳, 王佳慧, 牛萌萌. 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

Chang MY, Li CL, Dong J, Shang XY, Wang JH, Niu MM. Dynamic changes of phytoplankton composition during cyanobacteria blooms in aquaculture ponds. Progress in Fishery Sciences, 2019, 40(1): 36-45

蓝藻水华暴发期间养殖池塘浮游藻类动态变化*

常孟阳 李晨露 董静^① 尚向阳 王佳慧 牛萌萌

(河南师范大学水产学院 新乡 453007)

摘要 2017年7~9月对河南师范大学养殖基地暴发蓝藻水华的养殖池塘进行监测。结果显示,共鉴定浮游藻类25种(属),隶属于5门。7月水华初期和8月水华中期,优势种均为微囊藻(*Microcystis* sp.),占总浮游藻类的99%以上。浮游藻类丰度和生物量波动范围分别为 $(0.883\sim 12.666)\times 10^8$ cells/L和9.740~70.020 mg/L,生物多样性为0.05~1.15。总磷(TP)和总氮(TN)含量分别为0.32~0.51和4.18~7.09 mg/L,水温为22.1~30.6℃。TP、TN、水温较高是造成蓝藻水华暴发的主要原因之一,蓝藻水华暴发造成生物多样性整体偏低。冗余分析(RDA)结果显示,浮游藻类密度和生物量与TP、TN含量呈正相关,蓝藻门(Cyanophyta)与水温、TP、TN呈正相关。同时,微囊藻暴发最大的威胁是微囊藻毒素(Microcystins, MCs)的释放,根据世界卫生组织规定的MCs含量不得超过1.0 μg/L,否则就会对水生生物产生危害。实验结束时,对水样和胞内MCs的测定。研究表明,水样中MCs含量为0.040 μg/L,胞内MCs含量为0.686 μg/L,该养殖池塘微囊藻毒素含量在安全范围内。

关键词 养殖池塘;理化因子;浮游藻类;蓝藻水华;微囊藻毒素

中图分类号 S949 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2019)01-0036-10

浮游藻类是水生生态系统中重要的初级生产者,其种类、数量和生物多样性的变化与水环境密切相关,并决定着水生生态系统的结构和功能,是评价水体营养程度和水质状况的重要指标之一。很多藻类还是浮游动物和鱼类的主要食物来源和开口饵料,总之,浮游藻类是水生生态系统中重要的组成部分。近年来,随着池塘养殖密度增大,饵料投放导致N、P含量大幅度增加,养殖池塘(尤其在夏季高温)往往大范围暴发蓝藻(*Cyanobacteria*)水华(宋超等,2012a, b; Hallegreff, 1993)。蓝藻水华暴发给养殖水生态系统带

来了极大威胁(包括水质理化参数改变、生物群落结构变化、高等经济动物不宜生存)(李媛等,2015;陈小锋等,2014;杨桂山等,2010; Vasconcelos *et al*, 2001)。此外,微囊藻(*Microcystis* sp.)还会向水体释放次级代谢产物(微囊藻毒素),微囊藻毒素(Microcystins, MCs)分布广、毒性大,具有肝脏毒性和肿瘤促进作用,水体中MCs积累到一定含量时,就会对水生生物产生毒害作用,影响水生态环境安全和水产品质量(厉威池等,2014;苏雅玲等,2013; Romo *et al*, 2012)。蓝藻水华暴发期间,水体MCs的含量不可忽视。因此,养

* 国家青年基金项目(31500380)、河南科学攻关项目(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), Startup Foundation for Docotors of Henan Normal University (qd14183), Henan University Science and Technology Innovation Team Support Program (14IRTSTHN013), and Key Disciplines in Aquaculture of Henan Province]. 常孟阳, E-mail: hstemy@163.com

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

收稿日期:2017-12-27, 收修改稿日期:2018-01-29

殖池塘水体富营养化是当前关注的热点之一。

目前,关于水华期间藻类群落结构变化的研究在湖泊、水库等大型水体报道较多,对养殖水体研究较少。而关于蓝藻水华暴发期间,集约化养殖池塘 MCs 含量的监测尚未报道(王超等, 2013; Papadimitriou *et al.*, 2012; 刘峰等, 2011; 杨柳等, 2011; 陆开宏等, 2008)。夏季是池塘藻类繁殖的高峰期,鱼类生长较快,水质变化较大,此时,对池塘水质进行准确评价分析具有重要意义。对于蓝藻水华暴发期间的养殖池塘进行监测,对水体改善提供一定的理论依据(乔麟等, 2017; 李恒等, 2013; 闫家国等, 2012; Illuminati *et al.*, 2012; 高云霓等, 2007)。

本文通过研究蓝藻暴发期间,养殖池塘理化因子和浮游藻类动态变化,可以反映蓝藻暴发池塘生态环境状况。另外,考虑到池塘水环境对水产品质量安全的影响,本研究也进行了养殖池塘水体和藻类细胞 MCs 含量的测定,为暴发蓝藻的养殖池塘水质和水产品质量安全提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 养殖池塘概况

本研究在河南师范大学养殖基地池塘进行(35°19'38.363" N, 113°54'09.482" E),面积为 200 m² 的水泥池,水深为 1.8~2.0 m,连续多年 7~9 月暴发蓝藻水华,该养殖池塘为典型成鱼池,主要养殖种类为鲤(*Carassius auratus*)、锦鲤(*Cyprinus carpio haematopterus*)、鲫鱼(*Carassius auratus*)、草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)以及麦穗(*Pseudorasbora parva*)等。

1.2 藻类采集与计数

对调查池塘进行浮游藻类水样采集并分析。浮游藻类采样水深为 0.5 m,采样 1 L,立即加入 15 ml 鲁哥氏液固定,样品带回实验室,沉淀 48 h,浓缩至 50 ml。采用光学显微镜,取 0.1 ml 样品于计数框内,显微镜下观察计数,每份样品重复 3 次,每次计数 50 个视野。浮游藻类鉴定及计数参考《中国淡水藻类》(胡鸿钧等, 2006)、《中国淡水生物图谱》(韩茂森等, 1995)、《湖泊富营养化调查规范》(金相灿等, 1990)等。以藻类密度>5%浮游藻类总密度定义为优势种。

1.3 水质检测

在池塘中设置固定水质采样点。每次 08:00 开始采样并测定。测定水温(WT),用采水器采集 0.5 m 水样 1 L,用孔径为 0.45 μm 的微孔滤膜(水系混合纤维

素),抽滤水样,用于测定氨氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、可溶性总氮(TDN)、可溶性总磷(TDP)、正磷酸盐(SRP)等因子的测定;使用原水样进行总磷(TP)和总氮(TN)的测定。水样营养盐测定方法参考《水和废水检测分析方法》第 IV 版(魏复盛, 2002)。

MCs 测定使用微囊藻毒素 ELISA 检测试剂盒,购于中国科学院水生生物研究所(武汉)。取 1 L 水样,用真空泵经过玻璃纤维滤膜(Whatman GF/C, 英国)过滤后分为滤液和滤膜两部分,滤膜上的藻细胞用于测定胞内毒素(Intracellular MCs),滤液用于测定胞外毒素(Extracellular MCs)。每份样品重复 3 次,藻细胞毒素采用冻融方法提取,主要参考囊藻毒素 ELISA 检测试剂盒藻细胞样品处理方法进行。

1.4 数据计算方法

本研究所分析的相关参数及计算方法如下:

浮游藻类密度计算公式(赵文, 2005)如下:

$$N' = (C_s / F_s \times F_n) \times (V_1 / U) \times P_n$$

式中, N' 为浮游藻类密度, C_s 为计数框面积(mm²), F_n 为视野数, F_s 为视野面积(mm²), U 为计数框体积(ml), V_1 为浓缩体积(ml), P_n 为计数出的藻类个数。

生物量:用细胞体积法推算生物量(赵文, 2005)。

浮游藻类生物多样性:浮游藻类生物多样性采用 Shannon-Wiener 香农-维纳多样性指数(H')(Shannon *et al.*, 1949)、Margalef 物种丰富度指数(d_{Ma})(Margalef *et al.*, 1968)、Pielou 均匀度指数表示(J)(Pielou *et al.*, 1969),微囊藻优势度采用 Berger-Parker 优势度指数(D)表示(潘晓洁等, 2014),其计算公式如下:

$$H' = - \sum P_i \times \log_2 P_i$$

$$d_{Ma} = (S - 1) / \log_2 N$$

$$J = H' / \log_2 S$$

$$D = n_{max} / N$$

式中, N 为样品中所有物种的总个体数, n_{max} 为优势种的个体数, J 为均匀度指数, S 为物种数目, P_i 为第 i 种的个体数与样品中总个体数的比值。

1.5 数据处理

数据整理和作图采用 Excel 2010 软件。应用 Canoco 4.5 软件进行浮游植物与环境因子间的关系分析。在数据分析前进行物种数据适合的模型检测,对浮游藻类密度数据进行除趋势对应分析(Detrended correspondence analysis, DCA),根据其轴长度确定分析类型[大于 4 使用典范对应分析(Canonical correspondence analysis, CCA),小于 3 使用冗余分析(Redundancy

analysis, RDA), 处于 3~4 二者均可]。另外, 在分析过程中, 对物种变量进行 $\lg(x+1)$ 转换(Jan *et al*, 2003)。

2 结果与分析

2.1 养殖池塘水体营养盐的动态变化

营养盐动态变化见图 1 和图 2。从图 1 和图 2 可以看出, TP 和 TN 变化不大, TP 最高值出现在 8 月 31 日, 为 0.51 mg/L, 最低值出现在 8 月 28 日, 为 0.32 mg/L。TN 最高值出现在 7 月 14 日, 为 7.09 mg/L, 最低值出现在 8 月 7 日, 为 4.18 mg/L。SRP 所占比例在 7、8 月上、中旬较平稳, 8 月下旬波动较大。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 所占比例有波动, 在 8 月中旬平均所占比例最小(图 3 和图 4)。

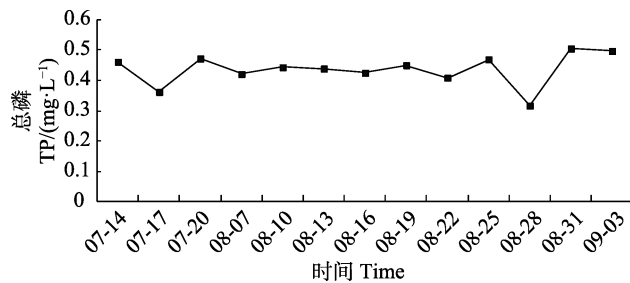


图 1 养殖池塘总磷(TP)含量动态变化
Fig.1 Variation of total phosphorus contents in aquaculture ponds

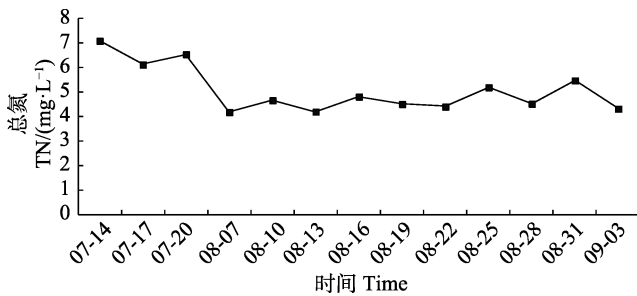


图 2 养殖池塘总氮(TN)含量动态变化
Fig.2 Variation of total nitrogen contents in aquaculture ponds

2.2 浮游藻类种类组成及分布

在蓝藻暴发的 7 月中旬、8 月的种类组成中,

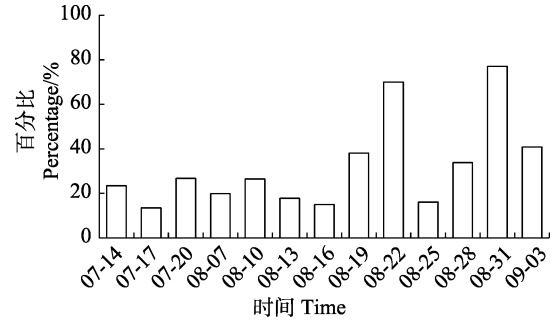


图 3 养殖池塘正磷酸盐含量所占比例变化
Fig.3 Variation of orthophosphate in aquaculture ponds

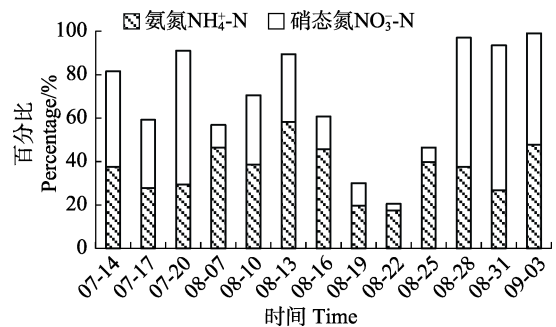


图 4 养殖池塘各形态氮含量所占比例变化
Fig.4 Variation of ammonia nitrogen and nitrate nitrogen in aquaculture ponds

7 月共鉴定浮游藻类 21 种(属), 8 月共鉴定 17 种(属)。隶属于蓝藻门(Cyanophyta)、隐藻门(Cryptophyta)、硅藻门(Bacillariophyceae)、裸藻门(Euglenophyta)和绿藻门(Chlorophyta)(表 1)。绿藻门种类组成所占比例最大, 但每种数目较少, 其次是蓝藻门。7 月和 8 月水华优势种均为微囊藻, 优势度高达 99%(图 5)。在浮游藻类种类中有四尾栅藻(*Scenedesmus quadricanda*)。在调查期间, 除微囊藻外数目较多, 其他各藻类数量比较少, 8 月下旬硅藻门的小环藻(*Cyclotella* sp.)数目增多, 蓝藻暴发期间, 优势种种类单一(表 2)。

2.3 浮游藻类丰度与生物量

浮游藻类丰度变化范围为 $(0.883 \sim 12.666) \times 10^8$ cells/L, 最高值出现在 7 月 20 日, 最低值出现在 8 月 28 日。生物量变化范围为 9.740~70.020 mg/L,

表 1 养殖池塘浮游藻类种类组成
Tab.1 Phytoplankton composition in aquaculture ponds

月 Months	蓝藻门 Cyanophyta	隐藻门 Cryptophyta	硅藻门 Bacillariophyceae	裸藻门 Euglenophyta	绿藻门 Chlorophyta	总计 Total
7	6(29%)	1(5%)	5(24%)	1(5%)	8(38%)	21(100%)
8	3(17.65%)	1(5.88%)	2(11.76%)	2(11.76%)	9(52.94%)	17(100%)

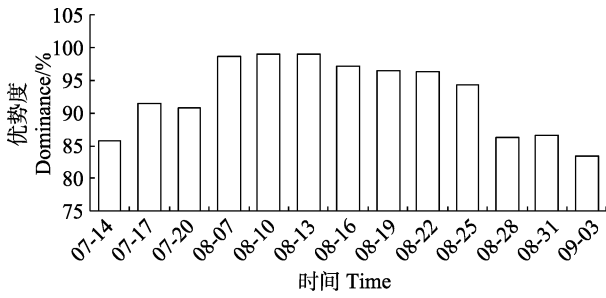


图 5 养殖池塘微囊藻优势度变化

Fig.5 Variation of *Microcystis* sp. in aquaculture ponds

丰度和生物量出现的最高值与最低值的时间一致。生物量在 7 月中旬有波动, 8 月相对平稳, 这可能与蓝藻水华暴发盛期, 微囊藻在 8 月为优势藻种有关(图 6 和图 7)。

2.4 浮游藻类生物多样性

从图 8 可以看出, 浮游藻类生物多样性指数、丰富度指数、均匀度指数总体呈先下降后上升的趋势, 变化范围为 0.056~1.147、0.203~0.892、0.024~0.507。

表 2 养殖池塘浮游藻类种类组成
Tab.2 Phytoplankton composition in aquaculture ponds

门 Phylum	种 Species	时间 Time												
		07-14	07-17	07-20	08-07	08-10	08-13	08-16	08-19	08-22	08-25	08-28	08-31	09-03
蓝藻门 Cyanophyta	平裂藻 <i>Merismopedia</i> sp.	+												
	水华束丝藻 <i>Aphanizomenon flasaquae</i>	+	+	+										
	微囊藻 <i>Microcystis</i> sp.	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
	极大螺旋藻 <i>Spirulina maxima</i>		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	颤藻 <i>Oscillatoris</i> sp.			+	+	+	+	+		+				+
	念珠藻 <i>Nostocales</i> sp.			+										
硅藻门 Bacillario- phyceae	小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	+			+	+		++	++	++	++	++	++	++
	卵形藻 <i>Cocconeis</i> sp	+		+				+						
	舟形藻 <i>Naucula</i> sp.	+												
	菱形藻 <i>Nitzschia</i> sp.			+										
裸藻门 Euglenophyta	纤细裸藻 <i>Euglena gracilis</i>				+		+		+	+				
	尖尾裸藻 <i>Euglena oxyuris</i>				+			+	+					
隐藻门 Cryptophyta 绿藻门 Chlorophyta	隐藻 <i>Cryptomons</i> sp.		+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	
	空星藻 <i>Coelastrum</i> sp.	+	+	+										
	狭形纤维藻 <i>Ankistrodesmus angustus</i>	+	+	+			+			+	+	+	+	
	四尾栅藻 <i>S. quadricanda</i>	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	
	月牙藻 <i>Selenastrum bibrainum</i>	+	+	+				+		+				
	四角十字藻 <i>Crucigenia quadrata</i>			+		+								
	斜生栅藻 <i>Scenedesmus obliquus</i>	+	+	+									+	
	爪哇栅藻 <i>Scenedesmus javaensis</i>	+	+	+									+	
	双对栅藻 <i>Scenedesmus bijuga</i>	+	+	+										
	二角盘星藻 <i>Pediastrum</i> sp.						+							
	美丽星杆藻 <i>Asterionella formosa</i>							+						
	三角藻 <i>Triceratim</i> sp.										+			

+为一般, ++为较多, +++为优势种

+ General, ++ More, +++ Dominant species

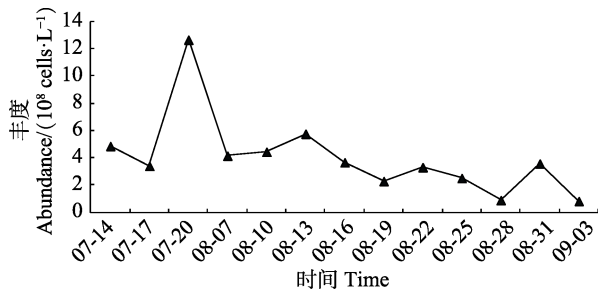


图6 养殖池塘浮游藻类丰度动态变化
Fig.6 Variation of phytoplankton abundance in aquaculture ponds

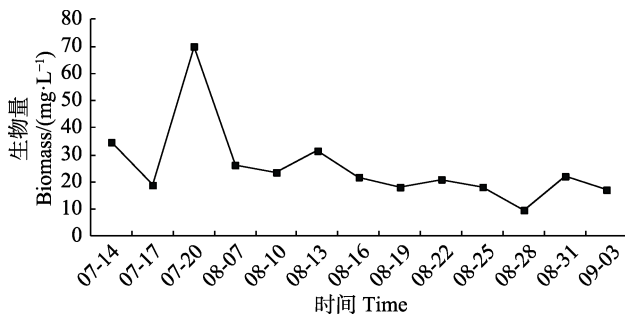


图7 浮游藻类生物量动态变化
Fig.7 Variation of phytoplankton biomass in aquaculture ponds

在8月中旬,生物多样性最低,各门藻类生物多样性也最低,从8月下旬开始,生物多样性开始上升。在7月中旬,绿藻门生物多样性最高,其次是蓝藻门,8月中旬,各门藻类生物多样性最低,8月下旬,硅藻门生物多样性最高,其次是蓝藻门(图9)。

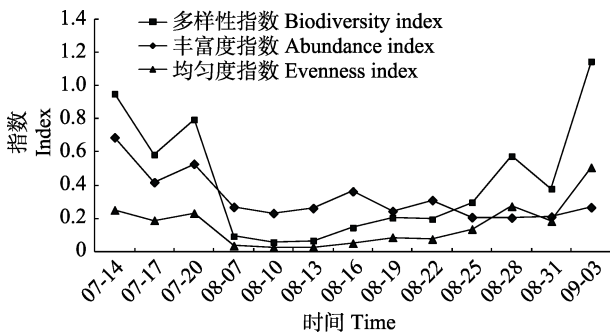


图8 养殖池塘浮游藻类多样性指数、均匀度指数和丰富度指数的变化
Fig.8 Variation of biodiversity, evenness and abundance index of phytoplankton in aquaculture ponds

2.5 浮游藻类与理化因子的相关性

在蓝藻水华暴发期间,养殖池塘浮游藻类丰度和生物量高,生物多样性低。从图10可以看出,TP、TDP、TN、WT与浮游藻类丰度、生物量呈正相关,浮游藻类生物多样性与TDP、SRP、WT呈显著负相

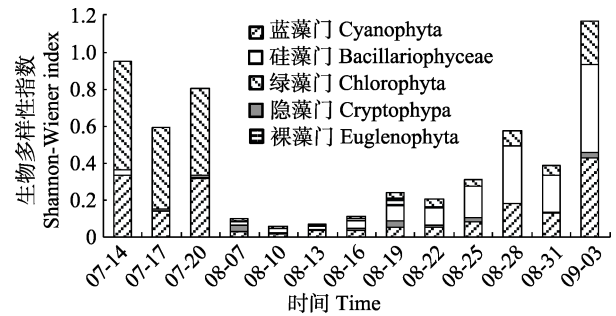


图9 养殖池塘各门藻类生物多样性动态变化
Fig.9 Variation of phytoplankton biodiversity (Shannon-wiener index) in each phylum

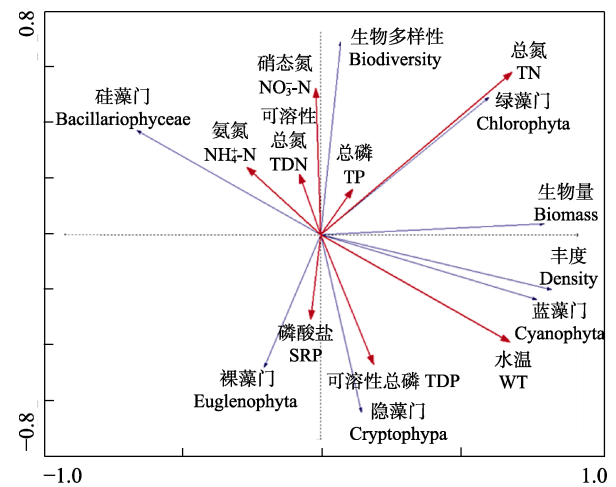


图10 浮游藻类丰度、生物量与环境因子的RDA分析
Fig.10 Redundancy analysis between phytoplankton abundance, biomass and environmental variables

关。蓝藻门与水温、TP、TN呈正相关。硅藻门与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TDN呈正相关;裸藻门与SRP呈正相关,与TP、TN呈负相关;隐藻门与TDP、WT呈正相关;绿藻门与TP、TN呈正相关。

2.6 微囊藻毒素含量测定

在监测结束时,对养殖池塘MCs使用ELISA测定,通过反复对标准曲线的制作,最终选择较好的标准曲线,得出水体中MCs含量为 $0.040 \mu\text{g/L}$,藻细胞中MCs含量为 $0.686 \mu\text{g/L}$ (图11)。胞内MCs明显高于胞外MCs含量,但无论是胞外还是胞内MCs含量均低于饮用水的安全标准($<1 \mu\text{g/L}$)。

3 讨论与结论

3.1 浮游藻类丰度及生物多样性

浮游藻类是养殖池塘生态系统的重要初级生产者,对维持池塘生态系统的稳定具有关键作用(石磊等, 2017; 于海波等, 2013; 刘冉等, 2013; 粟丽等,

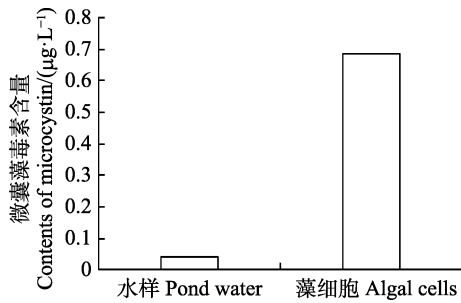


图 11 微囊藻毒素含量

Fig.11 Contents of microcystin in aquaculture ponds

2011)。在本研究中,共鉴定出浮游藻类 25 属(种),优势种为微囊藻,优势度为 83.5%~99.1%,蓝藻水华暴发期间,优势种单一。本研究中,浮游藻类丰度高达 12.666×10^8 cells/L,与前期调查的高产养殖池塘(李燕等,2017)、鲤鱼养殖池塘浮游藻类密度达 2.05×10^8 cells/L、草鱼养殖池塘浮游藻类密度为 7.10×10^8 cells/L 相比,浮游藻类丰度明显偏高,这可能是蓝藻水华期间,微囊藻为优势种有关。同样,郑丙辉等(2011)在大宁河水华敏感期浮游植物研究中指出,7 个采样点的藻细胞密度的最高值均出现在水华期。

生物多样性作为反映浮游植物群落生态特征的重要指标,不仅可以用来评价水体的污染程度,还可以从生态系统层面反映其稳定性(姜杨慧等,2016; Padisák *et al.*, 2006)。浮游藻类生物多样性指数、丰富度指数、均匀度指数均较低,总体呈先下降后上升的趋势,变化范围在 0.056~1.147、0.203~0.892、0.024~0.507 之间,蓝藻水华暴发形成了以微囊藻占优势的藻类结构,造成浮游藻类多样性整体偏低。生物多样性在 7 月中旬绿藻门和蓝藻门较高,8 月下旬,硅藻门和蓝藻门较高,随时间的变化使小型水体藻类多样性改变,但各门藻类整体多样性较低。通常情况下,藻类的物种多样性指数越高,其群落结构越复杂,稳定性越高(代存芳等,2017; 陈格君等,2013)。

综上所述,小型水体一般对环境因子的变化比较敏感,蓝藻水华的暴发造成浮游藻类的种类、密度、多样性在短时间内也会出现明显变化。

3.2 影响浮游藻类组成及多样性的因素

水温和营养盐是影响水体浮游藻类群落结构的重要因素。杨文等(2015)、陈家长等(2010)研究表明,蓝藻比较适应稳定水体,而且,也偏好较高光照强度和高温,微囊藻最适生长温度为 25~30℃。本研究在 7~9 月进行,水温为 25~30℃,适宜微囊藻的生长。由此可见,水温对浮游藻类的生长起着重要作用。TP、TN 最高值分别为 0.51、7.09 mg/L,根据渔业水质标

准规定,养殖池塘中 TP 的含量不得超过 0.2 g/L, TN 的含量不得超过 1.0 mg/L(姜杨慧等,2016),该池塘远远超出 TP、TN 标准含量。郑丙辉等(2011)研究表明,TP 水平是促进蓝藻水华暴发的关键因子,不会对微囊藻的生长产生限制,蓝藻具有储 P 机制,能够对 P 进行富集。池塘为混养模式,加之饵料的投入,池塘底部有底泥,这可能是养殖池塘蓝藻水华暴发的主要原因之一。在本研究中,通过 RDA 分析表明,TP、TDP、TN、WT 与浮游藻类丰度、生物量呈正相关,说明在蓝藻暴发水华期间,TN、TP、TDP、WT 的增加使浮游藻类细胞密度和生物量增加。

蓝藻门与 WT、TP、TN、TDP、SRP 呈正相关,说明蓝藻一般随着营养盐和 WT 的不断增加,优势度也会不断增加,与刘霞等(2012)对太湖浮游藻类演替规律的调查结果相似。硅藻门与 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、TDN 呈正相关,裸藻门与 SRP 呈正相关,与 TP、TN 呈负相关;隐藻门与 TDP、WT 呈正相关,与郑丙辉等(2015)对大宁河水华敏感期调查硅藻门与 NO_3^- -N 呈正相关,硅藻门、裸藻门与 TP 呈负相关,隐藻门与 WT 呈正相关结论相似。绿藻门与 TP、TN 呈正相关,这可能与该调查池塘自身环境条件有关。

一般认为,在中营养水平水体中,生物群落结构复杂,多样性较高,而在极端贫营养或富营养水体中,物种多样性较低,这主要是由于贫营养水体中,浮游藻类的营养较为匮乏,而在富营养水体中,一些对污染敏感的种类消失(孙鹏飞等,2015; Ma *et al.*, 2014; 唐萍等,2000)。营养水平对浮游藻类群落的改变按作用方向属于下行效应;浮游动物、滤食性鱼类等的影响属于上行效应。杨文等(2015)研究表明,小型水体营养水平的影响远大于浮游动物、滤食性鱼类等的影响。养殖池塘作为一种相对封闭的生态系统,由于其自净能力十分有限,常遭受更为严重的污染。整个养殖周期中,养殖池塘的理化因子不仅随着时间的推移而变化,而且,各理化因子之间也会相互影响(邵长清等,2017; Fernández *et al.*, 2015; 迟爽等,2014; 郭永坚等,2013)。在高温季节控制营养盐已成为治理水体富营养化和水华发生的主要手段(朱荣等,2015)。

3.3 微囊藻毒素测定

蓝藻水华暴发对水生生态系统的其中一个重要威胁就是 MCs 的释放,MCs 是由水体中蓝绿藻[如铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)、鱼腥藻(*Anabaena* sp.)等]产生的一类生物污染物。目前,已发现 80 余种结构极为相似的异构体,其中,MC-LR 是 MCs 异构体中毒性最强的一种,也是我国富营养化水体中毒性较

大的常见亚型(朱荣等, 2015)。MCs 释放到水里, 可通过化感作用与氧胁迫影响浮游藻类的群落结构, 改变水生生物多样性。长期暴露于 MCs 的鱼类、虾、蟹等水生动物也会受其危害, 最终还可能通过食物链的生物富集危害人类健康(谢平, 2015; 金显仕等, 2015; 杨晓红等, 2013)。夏季环境是养殖池塘暴发水华的敏感期, 管理不善很容易暴发水华。在本研究结束时, 定量分析了微囊藻毒素 MC-LR。结果表明, MCs 水样中, 其含量为 0.040 $\mu\text{g/L}$, 藻细胞中微囊藻毒素含量为 0.686 $\mu\text{g/L}$ 。根据世界卫生组织以及相关报道, MCs 含量安全范围不得超过 1.0 $\mu\text{g/L}$ (刘艳红等, 2016; Sotton *et al.*, 2014), 本养殖池塘 MCs 含量基本在安全范围之内。

参 考 文 献

- Chen GJ, Zhou WB, Li MT, *et al.* Research on the of nitrogen and phosphorus on the phytoplankton community in Poyang Lake. *China Rural Water and Hydropower*, 2013(3): 48–52 [陈格君, 周文斌, 李美婷, 等. 鄱阳湖氮磷营养盐对浮游植物群落影响研究. *中国农村水利水电*, 2013(3): 48–52]
- Chen JZ, Meng SL, Hu G, *et al.* Effects of temperature on interspecific competition between two blue-green algae. *Chinese Journal of Ecology*, 2010(3): 454–459 [陈家长, 孟顺龙, 胡庚, 等. 温度对两种蓝藻种间竞争的影响. *生态学杂志*, 2010(3): 454–459]
- Chen XF, Chuai XM, Yang LY. Status quo, historical evolution and causes of eutrophication in lakes in typical lake regions of China. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, 30(4): 438–443 [陈小锋, 揣小明, 杨柳燕. 中国典型湖区湖泊富营养化现状、历史演变趋势及成因分析. *生态与农村环境学报*, 2014, 30(4): 438–443]
- Chi S, Liu HJ, Liu R, *et al.* Variation of physicochemical indices and bacterial numbers in sediment of *Apostichopus japonicus* culture ponds. *Progress in Fishery Sciences*, 2014, 35(1): 111–117 [迟爽, 刘海军, 刘冉, 等. 刺参养殖池塘底泥理化指标和细菌数量变化的检测. *渔业科学进展*, 2014, 35(1): 111–117]
- Dai CF, Yi YT, Liu Y, *et al.* Seasonal changes of diatom community structure in the Zhalong Wetland and its relationship with environmental conditions. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(8): 2818–2827 [代存芳, 易映彤, 刘妍, 等. 扎龙湿地硅藻植物群落季节变化及其对环境的响应. *生态学报*, 2017, 37(8): 2818–2827]
- Fernández C, Estrada V, Parodi ER. Factors triggering cyanobacteria dominance and succession during blooms in a hypereutrophic drinking water supply reservoir. *Water Air and Soil Pollution*, 2015, 226(3): 72–73
- Gao YN, Wu XH, Deng P, *et al.* Ecological characteristics of phytoplankton in a constructed wetland-pond integrated aquaculture system. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4): 1230–1234 [高云霓, 吴晓辉, 邓平, 等. 人工湿地—池塘复合养殖系统中浮游藻类生态特征. *农业环境科学学报*, 2007, 26(4): 1230–1234]
- Guo YJ, Shen YP, Wang F, *et al.* Nutrient fluxes across sediment-water interface in different grass carp polyculture enclosures. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2013, 37(4): 595–605 [郭永坚, 沈勇平, 王芳, 等. 草鱼不同养殖模式实验围隔内沉积物—水界面营养盐通量的研究. *水生生物学报*, 2013, 37(4): 595–605]
- Hallegraff GM. A review of harmful algal bloom and their apparent global increase. *Phycologia*, 1993, 32(2): 88–79
- Han MS, Shu YF. The freshwater biological map of China. Beijing: China Ocean Press, 1995, 10–327 [韩茂森, 束蕴芳. 中国淡水生物图谱. 北京: 海洋出版社, 1995, 10–327]
- Hu HJ, Wei YX. The freshwater algae of China systematics, taxonomy and ecology. Beijing: Science Press, 2006, 23–903 [胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类—系统、分类及生态. 北京: 科学出版社, 2006, 23–903]
- Illuminati S, Annibaldi A, Romagnoli T, *et al.* Distribution of Cd, Pb and Cu between dissolved fraction, inorganic particulate and phytoplankton in seawater of Terra Nova Bay (Ross sea, Antarctica) during austral summer 2011–12. *Chemosphere*, 2012, 185: 1122–1135
- Jan L, Petr S. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO. Cambridge: Cambridge University Press, 2003, 250–259
- Jiang YH, Han Q, Hu SJ, *et al.* Contrast of water quality in different culture ponds of Dongting Lake region. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2016, 44(26): 76–78 [姜杨慧, 韩庆, 胡思佳, 等. 洞庭湖区不同养殖池塘的水质对比. *安徽农业科学*, 2016, 44(26): 76–78]
- Jin XC, Tu QY. Lake eutrophication investigation specification (Second edition). Beijing: China Environmental Science Press, 1990, 156–260 [金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范 (第 II 版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990, 156–260]
- Jin XS, Dou SZ, Shan XJ, *et al.* Hot spots of frontiers in the research of sustainable yield of Chinese inshore fishery. *Progress in Fishery Sciences*, 2015, 36(1): 124–131 [金显仕, 窦硕增, 单秀娟, 等. 我国近海渔业资源可持续产出基础研究的热点问题. *渔业科学进展*, 2015, 36(1): 124–131]
- Li H, Li MZ, Cao J, *et al.* Effects of temperature on nitrogen uptake and growth in several species of macroalgae. *Progress in Fishery Sciences*, 2013, 34(1): 159–165 [李恒, 李美真, 曹婧, 等. 温度对几种大型海藻硝氮吸收及其生长的影响. *渔业科学进展*, 2013, 34(1): 159–165]
- Li WC, Ma CX, Guo ZW, *et al.* The abundance and toxin level of blue-green alga microcystis in Yueya Lake in Hulin City at and after bloom occurrence. *Chinese Journal of Fisheries*, 2014, 27(3): 12–16 [厉威池, 马成学, 郭志伟, 等. 虎林市

- 月牙湖微囊藻水华暴发时及其后期的藻类丰度和毒素含量. 水产学杂志, 2014, 27(3): 12–16]
- Li Y, Chang MY, Dong J, *et al.* Study on phytoplankton composition of typical aquaculture ponds in Zhongmou County. *Henan Fisheries*, 2017(3): 21–23 [李燕, 常孟阳, 董静, 等. 河南中牟县典型养殖池塘浮游藻类调查. 河南水产, 2017(3): 21–23]
- Li Y, Zhang JW, Wei J, *et al.* Advances in mechanism of the occurrence, hazard, and prevention control utilization of cyanophytic blooms in China. *Journal of Microbiology*, 2015, 35(4): 93–97 [李媛, 张家卫, 魏杰, 等. 我国蓝藻水华的发生机理、危害及防控利用研究进展. 微生物学杂志, 2015, 35(4): 93–97]
- Liu F, Li XQ, Dong GC, *et al.* Water pollution of Yellow River estuary coastal wetland. *China Environmental Science*, 2011, 31(10): 1705–1710 [刘峰, 李秀启, 董贯仓, 等. 黄河口滨海湿地水质污染物现状研究. 中国环境科学, 2011, 31(10): 1705–1710]
- Liu R, Chi S, Cheng JW, *et al.* Variation in phytoplankton and benthic alga communities in sea cucumber *Apostichopus japonicus* culture ponds. *Fisheries Science*, 2013, 32(10): 579–584 [刘冉, 迟爽, 程敬伟, 等. 仿刺参养殖池塘中浮游和底栖藻类群落的变化. 水产科学, 2013, 32(10): 579–584]
- Liu X, Lu XH, Chen YW. Long-term evolution of planktonic diatoms and their relationships with environmental factors in Lake Taihu. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(4): 821–827 [刘霞, 陆晓华, 陈宇炜. 太湖浮游硅藻时空演化与环境因子的关系. 环境科学学报, 2012, 32(4): 821–827]
- Liu YH, Lin F, Wu QF, *et al.* Detection and analysis of microcystins and organic pollutants in Poyang Lake. *Journal of Gannan Medical University*, 2016, 36(6): 868–871 [刘艳红, 林芬, 吴清锋, 等. 鄱阳湖部分湖区微囊藻毒素和有机污染物检测与分析. 赣南医学院学报, 2016, 36(6): 868–871]
- Lu KH, Zhu JY, Wang YC, *et al.* Structure and dynamics of plankton community and their impact factors based on CCA analysis in Hunanzhen Reservoir. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2008, 15(6): 950–960 [陆开宏, 朱津永, 王扬才, 等. 湖南镇水库浮游生物及其影响因子的典范对应分析. 中国水产科学, 2008, 15(6): 950–960]
- Ma JR, Brookes JD, Qin BQ, *et al.* Environmental factors controlling colony formation in blooms of the cyanobacteria *Microcystis* spp. in Lake Taihu, China. *Harmful Algae*, 2014, 31: 136–142
- Marganef DR. *Perspectives in ecological theory*. Chicago: University of Chicago Press, 1968, 1–111
- Padisák J, Borics G, Grigorczyk I, *et al.* Use of phytoplankton assemblages for monitoring ecological status of lakes within the water framework directive: The assemblage index. *Hydrobiologia*, 2006, 553(1): 1–14
- Pan XJ, Zhu AM, Zheng ZW, *et al.* Structural characteristics and influencing factors of phytoplankton community in the middle and lower reaches of Hanjiang River during spring season. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(1): 33–40 [潘晓洁, 朱爱民, 郑志伟, 等. 汉江中下游春季浮游植物群落结构特征及其影响因素. 生态学杂志, 2014, 33(1): 33–40]
- Papadimitriou T, Kagalou I, Stalikas C, *et al.* Assessment of microcystin distribution and biomagnification in tissues of aquatic food web compartments from a shallow lake and evaluation of potential risks to public health. *Ecotoxicology*, 2012, 21(4): 1155–1166
- Pielou EC. *An introduction to mathematical ecology*. New York: Wiley-Interscience, 1969, 1–286
- Qiao L, Zhang M, Li XJ, *et al.* Phytoplankton response to nitrogen: Phosphorus ratio in fodder for intensive grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) aquaculture. *Ecological Science*, 2017, 36(4): 95–100 [乔麟, 张曼, 李学军, 等. 草鱼 (*Ctenopharyngodon idellus*) 集约化养殖中浮游植物对饲料氮磷比的响应. 生态科学, 2017, 36(4): 95–100]
- Romo S, Fernández F, Ouahid Y, *et al.* Assessment of microcystins in lake water and fish (*Mugilidae*, *Liza* sp.) in the largest Spanish coastal lake. *Environmental Monitoring Assessment*, 2012, 184(2): 939–949
- Shannon CE, Weaver W. *The mathematical theory of communication*. Urbana IL: University of Illinois Press, 1949, 296
- Shao CQ, Gao QF, Dong SL, *et al.* Effects of urea hydrogen peroxide on the growth of sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) and the sediment environment of its culture waters. *Periodical of Ocean University of China (Natural Science)*, 2017, 47(8): 51–57 [邵长清, 高勤峰, 董双林, 等. 不同浓度的过碳酸铵对刺参生长及养殖底质环境的影响. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, 47(8): 51–57]
- Shi L, Yuan JJ, Shao GE, *et al.* Study on the dynamic changes of physical and chemical factors and planktonic algae in high efficiency cultivation ponds of *Penaeus vannamei*. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science)*, 2017, 36(2): 151–158 [石磊, 袁家俊, 邵国洱, 等. 南美白对虾大棚高效养殖池塘理化因子与浮游藻类动态变化研究. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2017, 36(2): 151–158]
- Song C, Chen JZ, Qiu LP, *et al.* Ecological remediation technologies for China's freshwater aquaculture pond environment: A review. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(9): 2425–2430 [宋超, 陈家长, 裘丽萍, 等. 中国淡水养殖池塘环境生态修复技术研究评述. 生态学杂志, 2012, 31(9): 2425–2430]
- Song C, Meng SL, Fan LM, *et al.* Environmental impact and countermeasures of freshwater fishpond aquaculture in China. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(26): 89–92 [宋超, 孟顺龙, 范立民, 等. 中国淡水池塘养殖面临的环境问题及对策. 中国农学通报, 2012, 28(26): 89–92]

- Sotton B, Guillard J, Anneville O, *et al.* Trophic transfer of microcystins through the lake pelagic food web: Evidence for the role of zooplankton as a vector in fish contamination. *Science of the Total Environment*, 2014, 466–467: 152–163
- Su L, Zhu CB, Zhang HH, *et al.* Impact of polycultured tilapia with shrimp on phytoplankton community and the relationship between the composition of phytoplankton dominant species and the growth of tilapia. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2011, 38(14): 101–104 [粟丽, 朱长波, 张汉华, 等. 混养罗非鱼对虾池浮游微藻群落的影响及浮游微藻优势种组成与罗非鱼生长的关系. *广东农业科学*, 2011, 38(14): 101–104]
- Su YL, Deng YR. Microcystins in eutrophic lakes and their controlling and removing methods. *Environmental Science and Technology*, 2013, 36(6): 62–66 [苏雅玲, 邓一荣. 富营养化湖泊中微囊藻毒素及其控制去除技术. *环境科学与技术*, 2013, 36(6): 62–66]
- Sun PF, Dai FQ, Chen YL, *et al.* Seasonal variations in structure of fishery resource in the Yangtze River estuary and its adjacent waters. *Progress in Fishery Sciences*, 2015, 36(6): 8–16 [孙鹏飞, 戴芳群, 陈云龙, 等. 长江口及其邻近海域渔业资源结构的季节变化. *渔业科学进展*, 2015, 36(6): 8–16]
- Tang P, Wu GR, Lu CM, *et al.* Effects of the excretion from root system of *Eichhornia crassipes* on the cell structure and metabolism of *Scenedesmus arcuatus*. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, 20(3): 355–359 [唐萍, 吴国荣, 陆长梅, 等. 凤眼莲根系分泌物对栅藻机构及代谢的影响. *环境科学学报*, 2000, 20(3): 354–359]
- Vasconcelos VM, Pereira E. Cyanobacteria diversity and toxicity in a wastewater treatment plant (Portugal). *Water Research*, 2001, 35(5): 1354–1357
- Wang C, Gao YC, Wang PF, *et al.* Eutrophication and characteristics of phytoplankton distributions in Changtan Reservoir, Guangdong Province. *Journal of Lake Science*, 2013, 25(5): 749–755 [王超, 高越超, 王沛芳, 等. 广东长潭水库富营养化与浮游植物分布特征. *湖泊科学*, 2013, 25(5): 749–755]
- Wei XS. *Water and wastewater monitoring analysis method*. Beijing: China Environmental Press, Fourth edition, 2002, 243–284 [魏复盛. *水和废水检测分析方法*. 北京: 中国环境出版社, 第四版, 2002, 243–284]
- Xie P. Cyanobacterial blooms and their secondary harms. *Journal of Hydroecology*, 2015, 36(4): 1–13 [谢平. 蓝藻水华及其次生危害. *水生态学杂志*, 2015, 36(4): 1–13]
- Yan JG, Huang HH, Qi ZH, *et al.* Characteristics of phytoplankton community in the autumn aquaculture pond of Pearl River estuary. *Guangdong Agricultural Science*, 2012(16): 138–141 [闫家国, 黄洪辉, 齐占会, 等. 珠江口养殖池塘秋季浮游植物群落特征研究. *广东农业科学*, 2012(16): 138–141]
- Yang GS, Ma RH, Zhang L, *et al.* Lake status, major problems and protection strategy in China. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(6): 799–810 [杨桂山, 马荣华, 张路, 等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略. *湖泊科学*, 2010, 22(6): 799–810]
- Yang L, Zhang M, Liu ZW. Uptake of various forms of nitrogen by phytoplankton community in spring in Lake Taihu. *Journal Lake Science*, 2011, 23(4): 605–611 [杨柳, 章铭, 刘正文, 等. 太湖春季浮游植物群落对不同形态氮的吸收. *湖泊科学*, 2011, 23(4): 605–611]
- Yang W, Zhu JY, Zhang KX, *et al.* Community dynamics of phytoplankton and related affecting factors in a eutrophicated small pond. *Environmental Science*, 2015, 36(4): 1309–1316 [杨文, 朱津永, 张克鑫, 等. 一小型藻华池塘浮游植物群落动态及其影响因子研究. *环境科学*, 2015, 36(4): 1309–1316]
- Yang XH, Pu CW, Zhang RP, *et al.* Assessment on non-carcinogenic health risk of microcystins in the water environment of Chongqing. *China Environmental Science*, 2013, 33(1): 181–185 [杨晓红, 蒲朝文, 张仁平, 等. 水体微囊藻毒素污染对人群的非致癌健康风险. *中国环境科学*, 2013, 33(1): 181–185]
- Yu HB, Gao QF, Sun YJ, *et al.* Dynamic change and circulation of nutrients in polyculture system of sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) and shrimp (*Fenneropenaeus chinensis*). *Periodical of ocean University of China (Natural Science)*, 2013, 43(9): 25–32 [于海波, 高勤峰, 孙永军, 等. 刺参-对虾复合养殖系统主要营养盐动态变化及循环过程的研究. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2013, 43(9): 25–32]
- Zhao W. *Hydrobiology*. Beijing: China Agriculture Press, 2005, 19–125, 502–503 [赵文. *水生生物学*. 北京: 中国农业出版社, 2005, 19–125, 502–503]
- Zheng BH, Zhang JL, Wang LJ, *et al.* Exploration of relationships between phytoplankton and related environmental factors in the Daning River during sensitive period of algal blooms. *Environmental Science*, 2011(3): 641–648 [郑丙辉, 张佳磊, 王丽婧, 等. 大宁河水华敏感期浮游植物与环境因子关系. *环境科学*, 2011(3): 641–648]
- Zhu R, Wang H, Yu DZ, *et al.* Dynamic changes of microcystins and phytoplankton during the cyanobacterial bloom in Lake Erhai in 2013. *Journal of Lake Science*, 2015, 27(3): 378–384 [朱荣, 王欢, 余得昭, 等. 2013年洱海水华期间微囊藻毒素和浮游植物动态变化. *湖泊科学*, 2015, 27(3): 378–384]

Dynamic Changes of Phytoplankton Composition During Cyanobacteria Blooms in Aquaculture Ponds

CHANG Mengyang, LI Chenlu, DONG Jing^①, SHANG Xiangyang, WANG Jiahui, NIU Mengmeng
(College of Fisheries, Henan Normal University, Xinxiang 453007)

Abstract In order to further understand the dynamics of phytoplankton and its physio-chemical variables during the development of cyanobacterial blooms in aquaculture ponds, water samples were collected and evaluated in an aquaculture pond during the cyanobacterial bloom (July to September, 2017) in Henan Normal University, Xinxiang, Henan (35°19'38.363"N, 113°54'09.482"E). The results showed that during the study periods, in total, 25 phytoplankton species belonging to six phyla were identified, and the total phytoplankton abundance and biomass were $(0.883\sim 12.666) \times 10^8$ cells/L and 9.740~70.020 mg/L, respectively. Furthermore, the Shannon-Wiener index was determined, ranging between 0.05 and 1.15. Additionally, the total phosphorus (TP) and total nitrogen (TN) concentrations were 0.32~0.51 mg/L and 4.18~7.09 mg/L, respectively; the water temperature was 22.1~30.6°C. It was suggested that the high amount of TN and TP contents, combined with the high water temperature, might play important roles in this occurrence of cyanobacterial blooms and the low biodiversity in ponds. To further understand the key factors affecting phytoplankton composition, Redundancy analysis was applied. The results showed that cyanobacteria were closely related to the TP and TN concentrations and water temperature. In addition, in consideration of microcystin release due to the occurrence of *Microcystis* blooms, microcystin content was also determined in this study. At the end of the study periods, according to the ELISA, microcystin content was detected in algal cells and pond water, which were 0.686 µg/L and 0.040 µg/L, respectively. The World Health Organization suggested that the contents of microcystin should be no more than 1.0 µg/L in water samples. Thus, according to the present study, it suggested that the microcystin content was within the safety range in this bloom-occurring pond.

Key words Aquaculture Ponds; Physio-chemical variables; Phytoplankton; Cyanobacterial blooms; Microcystins

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