

东北盐碱池塘浮游植物群落结构特征与环境因子的关系

孟得微^{1,2,3}, 孙博^{2,3}, 张立民^{2,3}, 常玉梅^{2,3}, 王庆奎^{1*}, 梁利群^{2,3*}

(1. 天津农学院水产学院, 天津 300384; 2. 中国水产科学研究院黑龙江水产研究所, 淡水鱼类育种国家地方联合工程实验室, 黑龙江哈尔滨 150070; 3. 中国水产科学研究院黑龙江水产研究所, 黑龙江省特殊生境鱼类种质特性与抗逆育种重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150070)

摘要 为研究东北碳酸盐型盐碱池塘浮游植物群落结构及其与水质因子变化特征之间的相关性, 于2020年8—10月在黑龙江水产研究所盐碱水渔业利用(大庆)研究中心对3个中低碱度池塘进行了调查, 结果显示, 鉴定出浮游植物共计6门、65种, 各池塘不同月份的优势种存在差异, 但均表现出优势种较多且优势度较低的特点, 浮游植物分布较为均匀, 生态系统较为稳定。基于浮游植物群落的生物多样性指数对各养殖池塘进行水质评价, 结果显示, 1#、2#池塘整体处于富营养化状态, 4#池塘始终均处于清洁-寡污状态。Pearson相关性分析结果表明, 3个池塘浮游植物的总生物量和丰度与水质因子的相关性存在差异, 氨氮、溶解氧、温度、总磷、总氮、亚硝态氮、碱度、pH均对浮游植物群落结构存在不同程度上的影响。

关键词 浮游植物; 群落结构; 特征; 环境因子; 盐碱池塘; 水质调控

中图分类号 X173 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)21-0110-06

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.21.027



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Relationship between Phytoplankton Community Structure and Environmental Factors in Saline-alkali Ponds in Northeast China

MENG De-wei^{1,2,3}, SUN Bo^{2,3}, ZHANG Li-min^{2,3} et al (1. Fisheries College, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384; 2. Heilongjiang Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, National and Local Joint Engineering Laboratory of Freshwater Fish Breeding, Harbin, Heilongjiang 150070; 3. Heilongjiang Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Special Habitat Fish Germplasm Characteristics and Resistance Breeding, Harbin, Heilongjiang 150070)

Abstract Community structure of phytoplankton was surveyed in three alkalinity ponds at the Salt-Alkali Water Fisheries Utilization (Daqing) Research Center of Heilongjiang Fisheries Research Institute from August to October 2020, in order to understand the community structure of phytoplankton and its correlation with the change characteristics of water quality factors in carbonate saline-alkali ponds in Northeast China. The results showed that a total of 6 phyla and 65 species of phytoplankton were observed, the dominant species of phytoplankton were different in different months, but they all showed the characteristics of more dominant species and lower dominance, and the distribution of phytoplankton was more even, the ecosystem was stable. The water quality of each culture pond was evaluated based on the biodiversity index of phytoplankton community showed that 1# and 2# pond were eutrophication, and 4# pond was clean and less polluted all the time. The Pearson correlation analysis revealed that there were differences in the correlation between the total biomass and abundance of phytoplankton and water quality factors in the three ponds. Ammonia nitrogen, dissolved oxygen, temperature, total phosphorus, total nitrogen, nitrite nitrogen, alkalinity and pH all had different effects on the community structure of phytoplankton.

Key words Phytoplankton; Community structure; Characteristics; Environmental factor; Saline-alkali pond; Water quality regulation

近年来, 由于气候变化、河流湖泊水位下降、矿化度上升等因素, 淡水资源不断减少, 已成为制约内陆水产养殖业发展的限制因素。因此, 越来越多人将目光转向了盐碱水资源的渔业开发利用上, 以缓解内陆水产养殖业对淡水资源过度依赖^[1]。我国有0.46亿hm²的盐碱水资源, 主要分布在我国三北地区的19个省(区)^[2-3]。但由于盐碱水存在的高碱度、高离子系数、离子比例失衡等问题, 导致渔业生产效益低下^[4-6]。黑龙江地区以碳酸盐型盐碱水为主, 其水质具有高碱、高pH的特点, 水域生产力十分低下^[7]。因此, 建立有效的水质调控技术、改善盐碱水养殖环境是确保养殖生物健康生长的重要内容之一。

浮游植物作为水生态系统的初级生产者, 对环境因子变化的响应尤为敏感, 可作为反映水质变化的“指示剂”。浮游

植物吸收水体中的CO₂、氨氮进行光合作用并释放氧气, 既满足了养殖动物对氧的需求, 又使残饵及排泄物降解更充分, 还可提高亚硝态氮等的转化率, 降低水体污染程度, 同时可直接或间接地为养殖动物摄食^[8-14]。因此, 浮游植物的群落组成及结构稳定性与养殖池塘水体质量、养殖对象的健康生长密切相关, 利用浮游植物的生态调控功能来改善养殖水环境亦是目前池塘生态研究热点之一^[15-16]。

针对黑龙江地区盐碱池塘水质特点, 该研究对大庆连环湖中碱度养殖池塘开展浮游植物群落结构、密度、生物量调查研究, 探究其生态系统中浮游植物的消长过程及其与水质因子间的相关性, 为后期利用浮游植物的生态调控功能改善养殖水环境、建立中碱度养殖池塘生态养殖技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 采样点的设置 试验地点为大庆连环湖3口碱度为10~30 mmol/L的碱水池塘, 沿养殖池塘边等间距设置5个采样点。试验时间为2020年8—10月, 每月采样一次, 采样时间为08:00—10:00。

1.2 浮游植物样品采集与处理

1.2.1 浮游植物定量样品。用5 L有机玻璃采水器在各采

基金项目 国家重点研发计划“生态适应型品种开发与池塘增效养殖技术”(KY2020210100)。

作者简介 孟得微(1996—), 女, 黑龙江大庆人, 硕士研究生, 研究方向: 渔业发展。*通信作者: 王庆奎, 教授, 博士, 硕士生导师, 从事海水鱼营养需求与人工配合饲料研制工作; 梁利群, 研究员, 博士, 博士生导师, 从事鱼类抗逆分子遗传机理及基因工程育种研究。

收稿日期 2021-07-14; 修回日期 2021-08-10

样点水面下 0.5 m 处采集水样,混合均匀后置于 1 L 采样瓶中,加 15 mL 鲁哥氏液固定,静态沉淀 48 h 后,利用虹吸去除上层液体,定容至 50 mL,加入 4% 甲醛溶液保存。

1.2.2 浮游植物定性样品。采用 25 号浮游生物网在表层水体呈“∞”型来回缓慢拖动数次,将富集的藻类溶液倒入 50 mL 样品瓶中,加入 4% 甲醛溶液现场固定,带回实验室镜检。浮游植物的定量样本依据《淡水浮游生物研究方法》进行分析,浮游植物种类鉴定依据《中国淡水藻类——系统、分类及生态》《水生生物学》《淡水微型生物图谱》。

1.3 水质指标的测定 温度、溶解氧、pH 采用多功能水质分析仪现场测定;总磷采用钼酸铵分光光度法测定;总氮采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定;亚硝酸盐采用重氮-偶氮法测定;总氨氮采用纳氏试剂分光光度法测定;叶绿素 a 采用丙酮萃取分光光度法测定。

1.4 评价方法 用 Shannon-Weaver 多样性指数 (H')、Pielou 均匀度指数 (J)、Margalef 丰度指数 (D) 和 Mc-Naughton 优势度指数 (Y) 对养殖池塘浮游植物群落多样性和生态学特征进行分析评价,计算公式如下:

$$H' = -\sum p_i \times \ln p_i \quad (1)$$

$$J = H' / \log_2 S \quad (2)$$

$$Y = p_i \times f_i \quad (3)$$

$$D = (S - 1) / \ln(N) \quad (4)$$

式中, $p_i = n_i / N$, n_i 为第 i 种的个体数, N 为所有种类总个体数, f_i 为各采样点第 i 种的出现频率, S 为物种数。 $Y \geq 0.02$ 的浮游植物定为优势种。

1.5 统计分析 运用 SPSS 23.0 软件对浮游植物与水质因子进行 Pearson 相关性分析。

2 结果与分析

2.1 水质指标变化 从各池塘水质指标变化情况(图 1)可以看出,1#池塘中硝态氮和分子氮含量呈先升后降趋势,总氨氮和总氮含量呈下降趋势,亚硝态氮和总磷含量呈上升趋势。2#池塘中总氨氮、分子氮和总氮含量呈现先升后降趋势,亚硝态氮和总磷含量呈逐渐上升趋势,硝态氮含量呈逐渐下降趋势。4#池塘中总氨氮、总磷和总氮含量呈逐渐上升趋势,亚硝态氮含量呈先升后降趋势,分子氮含量呈先平稳后下降的趋势,硝态氮含量始终处于平稳状态。

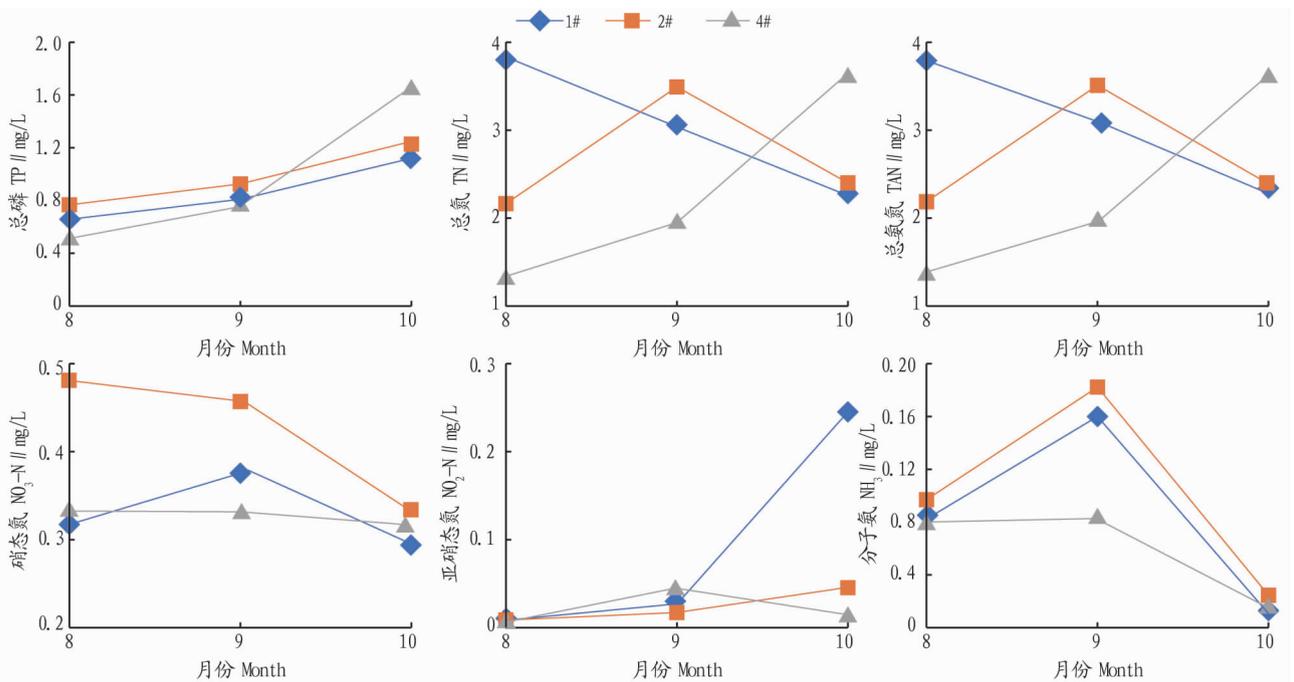


图 1 各养殖池塘水质因子变化情况

Fig. 1 Changes in water quality factors of each aquaculture pond

2.2 浮游植物种类及组成 试验期间共鉴定出浮游植物 6 门、65 种,各门种类数量分布见图 2,其中绿藻门(Chlorophyta)共 22 种,占有种类数的 33.8%,占比最高;其次是蓝藻门(20 种)、硅藻门(16 种)、裸藻门(5 种);最低的是金藻门和甲藻门,均为 1 种。

2.3 浮游植物丰度、生物量的变化 从各池塘浮游植物丰度与生物量变化(图 3)可以看出,1#池塘中浮游植物丰度为 $3.15 \times 10^6 \sim 14.43 \times 10^6$ 个/L,生物量为 8.17~28.72 mg/L;2#池塘浮游植物丰度为 $5.08 \times 10^6 \sim 9.60 \times 10^6$ 个/L,生物量为 21.89~25.86 mg/L;4#池塘中浮游植物丰度为 $4.22 \times 10^6 \sim$

5.61×10^6 个/L,生物量为 17.46~46.66 mg/L。

2.4 浮游植物生物多样性、均匀度变化 从各池塘浮游植物生物多样性、均匀度变化(表 1)可以看出,各池塘 Shannon-Weaver 指数 (H') 最高值均出现在 8 月,表明 8 月时群落复杂程度大,种类多。从 Pielou 均匀度指数 (J) 变化来看,1#、2#池塘波动较大,4#池塘相对平稳,说明 4#池塘浮游植物群落物种分布的均匀度较好。

利用浮游植物群落的生物多样性指数对各养殖池塘进行水质评价,3 项指数的值越大,表明多样性越高,水质越好。结果显示,1#、2#池塘整体上处于富营养化状态,而 4#池塘在

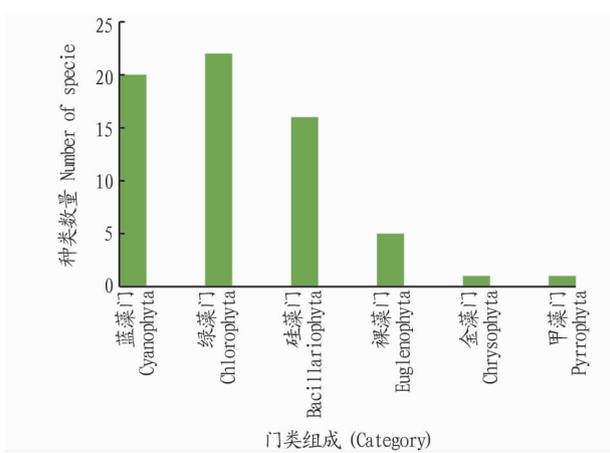


图2 浮游植物各门种类数量

Fig. 2 Species of phytoplankton in each category

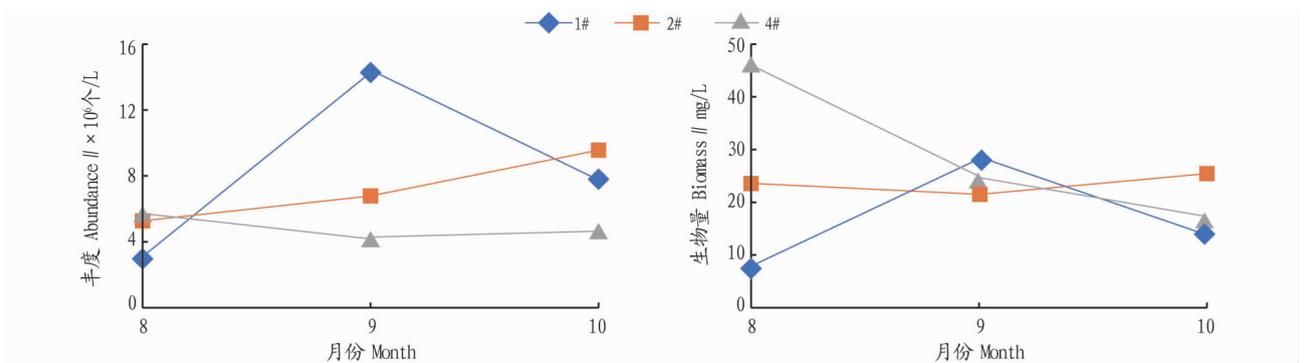


图3 各池塘浮游植物丰度、生物量变化

Fig. 3 Changes of abundance and biomass of phytoplankton in various ponds

表1 各池塘不同月份浮游植物的生物多样性指数

Table 1 Biodiversity index of phytoplankton in each pond in different months

月份 Month	<i>H'</i>			<i>J</i>			<i>D</i>		
	1#	2#	4#	1#	2#	4#	1#	2#	4#
8	4.59	4.65	4.20	0.83	0.85	0.78	3.07	2.78	2.64
9	2.14	2.66	4.14	0.39	0.55	0.76	2.78	1.72	2.75
10	1.54	3.96	4.14	0.29	0.74	0.76	2.64	2.43	2.34

4#池塘始终为裸藻-绿藻-硅藻群落,但相对丰度及优势种略有差异,8月主要优势种为陀螺藻,优势度达0.26;9月主要优势种为梭形鼓藻、舟形藻、扁裸藻,10月主要优势种为陀螺藻、新月菱形藻、普通小球藻。与1#、2#池塘相比,4#池

塘出现了大量的裸藻类植物,各月份的主要优势种大多归属于裸藻门,而蓝藻门相对丰度始终保持较低水平。此外,与1#、2#池塘有相似之处的是,硅藻门在10月相对丰度亦有明显升高。

3个月份中均属于清洁-寡污型,水质较好。
2.5 浮游植物优势种及优势度 从图4和表2可以看出,3个池塘不同月份浮游植物相对丰度和优势种存在差异。1#池塘8月为绿藻-硅藻-蓝藻群落,绿藻门为优势群落,主要优势种为普通小球藻、甲栅裂藻、小环藻;9月蓝藻门成为优势群落,相对丰度达75.21%,优势种为弯头尖头藻;10月为硅藻-绿藻-蓝藻群落,硅藻门相对丰度明显升高,小环藻优势度由0.10升至0.24,上升明显。

2#池塘8月为绿藻-硅藻-蓝藻群落,主要优势种为普通小球藻、帽形菱形藻等;9月为绿藻-裸藻-蓝藻群落,其中绿藻门相对丰度由46.44%上升至63.48%,主要优势种为普通小球藻,优势度达0.54;10月为硅藻-绿藻-蓝藻群落,主要优势种为新月菱形藻,优势度达0.31。

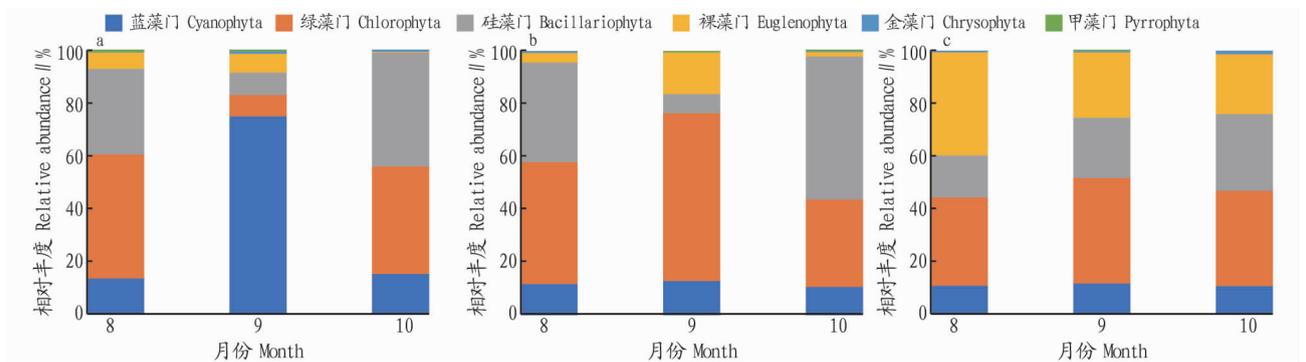


图4 1#(a)、2#(b)和4#(c)池塘各门类浮游植物相对丰度

Fig. 4 Relative abundance of of phytoplankton in each category in 1#(a), 2#(b) and 4#(c) pond

表 2 各池塘不同月份浮游植物优势种及优势度对比

Table 2 Dominant species and degree of phytoplankton in different months in each pond

优势种 Dominant species	1#池塘 1# pond			2#池塘 2# pond			4#池塘 4# pond		
	8月	9月	10月	8月	9月	10月	8月	9月	10月
普通小球藻 <i>C. vulgaris</i>	0.17	0.03	0.09	0.09	0.54	0.06	0.11	0.08	0.11
梭形鼓藻 <i>N. digitus</i>	0.04		0.03	0.05		0.05	0.02	0.19	
椭圆卵囊藻 <i>O. elliptica</i>			0.02	0.02					0.03
甲栅裂藻 <i>S. armatus</i>	0.11		0.07	0.03					
镰形纤维藻 <i>A. falcatus</i>	0.02		0.06			0.03			
新月藻 <i>Closterium</i>	0.02		0.06						
球状空星藻 <i>C. sphaericum</i>	0.02								
四足十字藻 <i>C. terapedia</i>				0.07		0.03	0.04	0.02	0.05
膨胀四角藻 <i>T. tumidulum</i>				0.03					
四角十字藻 <i>C. puadrata</i>				0.03					
柱状栅裂藻 <i>S. bijuga</i>				0.03					
鼓藻 <i>Cosmarium</i>				0.06			0.05	0.03	
实球藻 <i>Pandorina</i>					0.04		0.04		
针形纤维藻 <i>A. acicularis</i>						0.05			0.06
螺旋纤维 <i>A. spirilliformis</i>						0.03			
斜生栅裂藻 <i>S. brasiliensis</i>									0.03
小环藻 <i>Cyclotella</i>	0.10	0.02	0.24	0.09	0.03	0.08		0.03	0.08
舟形藻 <i>Navicula</i>	0.07	0.02	0.05	0.09	0.03	0.04	0.04	0.13	0.04
谷皮菱形藻 <i>N. palea</i>	0.03	0.02	0.03	0.09		0.02	0.03	0.05	0.02
脆杆藻 <i>Fragilaria</i>	0.03								
长菱形藻 <i>N. palea</i>	0.02		0.02	0.02		0.03	0.02		
新月菱形藻 <i>N. closterium</i>	0.02		0.06	0.02		0.31	0.04		0.13
狭形颗粒直链藻 <i>M. angustissima</i>				0.02			0.06		
螺形菱形藻 <i>A. spirilliformis</i>				0.03					
水华微囊藻 <i>M. flos-aquae</i>	0.06								0.02
针状蓝纤维藻 <i>D. acicularis</i>			0.04			0.03			0.03
湖沼色球藻 <i>Ch. limneticus</i>			0.04						0.02
无常蓝纤维藻 <i>D. irregularis</i>				0.03					
小形色球藻 <i>C. minor</i>				0.04					
最细螺旋藻 <i>S. subtilissima</i>								0.02	
阿氏拟鱼腥藻 <i>A. arnoldii</i>								0.03	
弯头尖头藻 <i>R. curvate</i>		0.72	0.02		0.11	0.02	0.03	0.04	
扁裸藻 <i>Phacus</i>	0.03	0.03			0.08		0.06	0.09	0.06
王氏裸藻 <i>E. wangi</i> Chu	0.02	0.02			0.04		0.03	0.07	
小尖尾裸藻 <i>E. oxyris</i>					0.02		0.04	0.02	
陀螺藻 <i>Strombomonas</i>							0.26	0.06	0.19

2.6 浮游植物群落与水质因子相关性 对各池塘浮游植物与水质因子进行 Pearson 相关性分析,结果表明(表 3),不同池塘浮游植物的总生物量和丰度与水质因子的相关性存在差异,浮游植物与个别水质因子的相关性差异不显著。整体来看,浮游植物群落的变化受总氮(TAN)、溶解氧(DO)、温度(T)、总磷(TP)、总氮(TN)、亚硝态氮(NO₂-N)、碱度(TA)、pH 等多种环境因素的共同影响。其中,1#、2#池塘浮游植物的总生物量和丰度与温度呈显著负相关,而 4#池塘与 1#、2#号池塘完全相反;2#池塘浮游植物丰度与总磷呈显著正相关,与碱度呈显著负相关。

综合各池塘浮游植物生物量与水质因子相关性分析结果来看,蓝藻门浮游植物生物量主要受总氮、溶解氧、总氮和温度的影响;绿藻类浮游植物生物量主要受亚硝态氮、温度和溶解氧的影响;硅藻类浮游植物生物量主要受到温度和 pH 的影响;裸藻类生物量主要受到温度和溶解氧的影响。

3 讨论

3.1 养殖池塘水质指标变化特征 各池塘总磷含量在研究期间均呈上升趋势,这与 Ren 等^[17]的研究结果一致,探究其原因,首先 8 月时水温较高,鱼类生长代谢旺盛,投喂量增加,残饵及排泄物等有机质逐渐积累;其次,8 月时较高的水温可能促进了池塘底泥中磷的释放,使总磷含量上升^[18]。9 月之后,水温下降,鱼类摄食减弱,代谢降低,但总磷含量仍持续上升,这可能是饵料投喂过量所致。

在研究期间,各池塘总氮与总氮含量的变化趋势相同,1#池塘呈下降趋势,2#池塘呈先升后降趋势,而 4#池塘呈逐渐上升趋势。藻类增殖会大量消耗水体中可溶解的氮磷,使其浓度下降。2#池塘浮游植物丰度、生物量始终缓慢上升,但由于有机质积累及底泥中氮的迅速释放,使氮的累积量多于藻类对氮的消耗量,故总氮含量有所上升,而后藻类持续增殖,对氮的消耗增多,同时随着水温下降,底泥的吸附

沉淀作用大于释放扩散作用,使总氮含量呈现下降趋势;4#池塘浮游植物丰度、生物量始终较为平稳,对氮消耗较少,来源于残饵、底泥和排泄物的氮不断累积,使总氮含量呈上升

趋势;1#池塘浮游植物丰度、生物量在9月大幅升高,有研究表明,在9—10月,水体氮能更好地为藻类光合作用所利用,水体氮含量显著降低^[19],这与1#池塘的结果相同。

表3 各池塘浮游植物与水质因子相关性

Table 3 Correlation between phytoplankton and water quality factors in each pond

项目 Item	池塘号 Pond number	总氮氮 TAN	分子氨 NH ₃	亚硝态氮 NO ₂ -N	硝态氮 NO ₃ -N	总磷 TP	总氮 TN	碱度 TA	pH	叶绿素 a Chla	温度 T	溶解氧 DO
浮游植物丰度 Phytoplankton abundance	1#	0.301	0.611	0.016	0.745	0.207	-0.418	0.972	0.372	0.362	-0.375**	0.287*
	2#	-0.871	-0.569	0.990	-0.967	0.997*	-0.023	-1.000*	-0.721	0.242	-0.911**	0.483**
	4#	0.470	0.115	-0.915	-0.303	-0.340	-0.419	-0.162	0.070	0.941	0.538**	-0.600**
浮游植物生物量 Phytoplankton biomass	1#	0.432	0.716	-0.125	0.832	0.068	-0.286	0.995	0.499	0.490	-0.286*	0.269*
	2#	-0.933	-0.996	0.740	-0.813	0.693	-0.786	-0.657	-0.993	-0.595	-0.386**	-0.128
	4#	0.893	0.666	-0.517	0.301	-0.819	-0.865	-0.701	0.632	0.964	0.834**	-0.611**
蓝藻门生物量 Cyanophyta biomass	1#	0.668	0.884	-0.400	0.954	-0.216	-0.004	0.982	0.723	0.716	-0.093	0.222
	2#	0.446	0.792	-0.093	0.207	-0.025	0.997*	-0.024	0.654	0.981	-0.181	0.469**
	4#	0.999*	0.911	-0.127	0.660	-0.981	-0.994	-0.929	0.891	0.774	0.886**	-0.464**
绿藻门生物量 Chlorophyta biomass	1#	-0.943	-0.769	1.000*	-0.640	0.985	-0.923	-0.203	-0.915	-0.919	-0.812**	0.151
	2#	0.184	-0.263	-0.527	0.426	-0.584	-0.750	0.622	-0.066	-0.898	0.590**	-0.612**
	4#	0.925	0.721	-0.449	0.373	-0.861	-0.901	-0.753	0.689	0.941	0.858**	-0.595**
硅藻门生物量 Bacillariophyta biomass	1#	-0.989	-0.979	0.892	-0.926	0.788	-0.633	-0.639	-0.997*	-0.997	-0.453**	-0.038
	2#	-0.997*	-0.930	0.903	-0.946	0.871	-0.574	-0.847	-0.985	-0.338	-0.629**	0.074
	4#	-0.851	-0.984	-0.460	-0.970	0.917	0.879	0.974	-0.991	-0.277	-0.552**	0.032
裸藻门生物量 Euglenophyta biomass	1#	0.774	0.945	-0.535	0.989	-0.363	0.149	0.942	0.820	0.814	0.019	0.191
	2#	0.685	0.934	-0.375	0.479	-0.311	0.977	0.264	0.844	0.885	0.027	0.361**
	4#	0.914	0.703	-0.472	0.349	-0.848	-0.890	-0.736	0.670	0.949	0.850**	-0.601**

注: *、**、*** 分别表示 0.05、0.01 水平差异显著

Note: *, **, *** respectively indicate significant differences at the level of 0.05 and 0.01

水体中过量的亚硝态氮对鱼体有毒害作用,该研究中各池塘亚硝态氮平均浓度均已超过渔业水质标准(≤ 0.005 mg/L),养殖过程中应在水质朝不良趋向发展时及时采取换水、施用生物制剂等措施加以改善、纠正。

3.2 养殖池塘中浮游植物群落结构特征 3个池塘共鉴别出浮游植物6门65种,从种的数量上来看绿藻门>蓝藻门>硅藻门>裸藻门>金藻门=甲藻门,与赵旭斌等^[20]对池塘浮游植物群落结构的研究结果相同,以绿藻门为主要种群,符合一般养殖池塘的浮游植物生长规律。

该研究中3个养殖池塘均表现为优势种较多且优势度较低,表明生态系统中浮游植物分布较为均匀,系统稳定。1#池塘9月时弯头尖头藻的激增现象值得注意。弯头尖头藻属丝状蓝藻,在低光照的富营养型水体中极具竞争优势,其数量激增是水质恶化的表征之一^[21]。基于浮游植物群落的生物多样性指数对各池塘进行水质评价,1#、2#池塘整体处于富营养化状态。此外,蓝藻在高温、低碱条件下竞争生长能力更强,1#池塘8—9月时的水体环境正符合该条件,是弯头尖头藻数量暴增的原因之一。2#池塘中蓝藻门从未成为主要群落。究其原因,绿藻同蓝藻在富营养化水体都具有竞争优势,但由于2#池塘碱度较高,更适应低碱的蓝藻在此时竞争能力不如绿藻^[22]。4#池塘的浮游植物主要群落为裸藻门,主要优势种也多来自裸藻门,裸藻大量繁殖是肥水、好水的标志。4#池塘始终处于清洁-寡污状态,池塘水质优于1#、2#池塘。3个池塘共同点是到10月,硅藻门优势种的优

势度、相对丰度均有明显升高。原因在于9月之后温度下降,适于低温生长的硅藻大量繁殖。

基于 Shannon-Wiener 指数、Pielou 均匀度指数^[23-24] 对水体的评价意义进行分析,发现该研究中3个养殖池塘浮游植物生物多样性较好,群落复杂程度较高,表明生态系统稳定性较好,但4#池塘优于2#池塘,1#池塘最差。

3.3 浮游植物群落与水质因子相关性分析 浮游植物的群落结构及其变化受营养盐浓度、温度、溶解氧、透明度、总磷、总氮、pH等多种环境因素的共同影响^[25-30],各因素对不同水体产生的影响差异较大,浮游植物群落对不同环境因子的响应亦不相同^[31]。在此次 Pearson 相关性分析中显示,总氮、溶解氧、温度、总磷、总氮、亚硝态氮、碱度、pH 皆对浮游植物群落结构存在不同程度的影响。

在该研究中,水温是影响浮游植物群落结构及其变化的重要因素之一。多数浮游植物增殖的适宜温度在18~25℃,其丰度会随温度升高而增大^[32-33]。在该研究中,仅4#池塘浮游植物丰度和生物量与温度呈显著正相关,与上述结论吻合,而1#、2#池塘与之相悖,这与各池塘群落组成及优势种不同有关。研究期间,4#池塘中裸藻类与绿藻类始终占主导地位,其变化代表总体的变化趋势,裸藻类和绿藻类植物喜温,而从8月到10月水温逐渐降低,4#池塘浮游植物丰度总体上随之呈现下降趋势。1#、2#池塘早期均为绿藻-硅藻-蓝藻群落,且硅藻类占比均达1/3以上,硅藻类大多喜低温,其丰度与生物量随着温度的下降逐渐上升,到10月时,1#、2#池塘均以硅

藻类为主要群落,浮游植物丰度与生物量总体呈上升趋势。

在该研究中,溶解氧对于浮游植物群落结构及其变化也具有重要影响。水体中溶解氧 90%以上源自藻类光合作用的释放,该研究中的 1#、2#池塘的浮游植物丰度以及 1#池塘浮游植物的生物量与溶解氧呈显著正相关。但 4#池塘浮游植物丰度和生物量却与溶解氧呈显著负相关,这可能是水体溶解氧受到了温度的影响,使得浮游植物的产氧量对水体溶解氧的含量作用效果不显著。

此外,2#池塘浮游植物的丰度与碱度呈显著负相关,这可能是由于 2#池塘碱度达 20 mmol/L 以上,一些不耐高碱的浮游植物增殖受到抑制。而 1#、4#池塘处于低碱度水平,不仅不会阻碍浮游植物的增殖,还会让某些在偏碱性水体中占优势的蓝藻类和绿藻类获得更好的生长条件^[34]。

氮磷营养盐是影响浮游植物群落的重要影响因子,在该研究中,2#池塘浮游植物的丰度与总磷呈显著正相关,蓝藻类的生物量与总氮呈显著正相关,表明 2#池塘中丰富的营养水平促进池塘中浮游植物尤其是蓝藻类的繁殖。

该研究中,蓝藻类主要受到总氮、溶解氧、温度、总氮的影响,绿藻类主要受到亚硝酸盐、溶解氧、温度的影响,硅藻类主要受到 pH、温度的影响,裸藻类主要受到溶解氧和温度的影响。

浮游植物的优势种群通常决定了藻类生态功能的发挥,其变动亦与生态系统的稳定、养殖动物的健康密切相关。因此,尝试在中高碱度养殖池塘中构建以有益藻类为基础的稳定、优良的藻相结构,必将使养殖环境向着良性方向转化。而筛选出环境适应性强的优良藻株,如小球藻、小环藻、新月菱形藻等,结合其密度、生长特性及养殖环境要求,可用于中高碱度池塘养殖生产,以期达到改善养殖环境的同时提高生产效率,也将是促进盐碱养殖业安全、健康发展的必由之路。

参考文献

[1] 梁利群,任波,常玉梅,等. 中国内陆咸(盐碱)水资源及渔业综合利用[J]. 中国渔业经济,2013,31(4):138-145.

[2] 董双林. 多维视角下的新时代水产养殖业发展[J]. 水产学报,2019,43(1):105-115.

[3] 刘永新,方辉,来琦芳,等. 我国盐碱水渔业现状与发展对策[J]. 中国工程科学,2016,18(3):74-78.

[4] 雷衍之,董双林,沈成钢. 碳酸盐碱度对鱼类毒性作用的研究[J]. 水产学报,1985,9(2):171-183.

[5] 王慧,来琦芳,房文红,等. 不同类型咸水的水产养殖研究[C]//王衍亮. 可持续水产养殖——资源、环境、质量——2003 水产科技论坛论文集. 北京:海洋出版社,2003:123-127.

[6] 王萍,刘济源,么宗利,等. 水生动物盐碱适应生理学研究进展[J]. 长江大学学报(自科版),2015,12(15):44-47.

[7] 何志辉,姜宏,毕凤山. 达里湖水化学和水生生物学再调研[J]. 大连水产学院学报,1996,11(2):1-13.

[8] 林更铭,杨清良,王雨,等. 福建北部海域浙闽沿岸流消亡期浮游植物的种类组成与分布特征[J]. 应用与环境生物学报,2012,18(3):411-420.

[9] 岳强,黄成,史元康,等. 广东南水水库富营养化与浮游植物群落动态[J]. 环境科学与技术,2012,35(8):112-116.

[10] BOYD C E. The chemical oxygen demand of waters and biological materials from ponds[J]. Transactions of the American fisheries society, 1973, 102(3):606-611.

[11] BOYD C E,ROMAIRE R P,JOHNSTON E. Predicting early morning dissolved oxygen concentrations in channel catfish ponds[J]. Transactions of the American fisheries society,1978,107(3):484-492.

[12] BARICA J. Collapses of *Aphanizomenon flos-aquae* blooms resulting in massive fish kills in eutrophic lakes:Effect of weather[J]. SIL Proceedings, 1978,20(1):208-213.

[13] BOYD C E,PRATHER E E,PARKS R W. Sudden mortality of a massive phytoplankton bloom[J]. Weed science,1975,23(1):61-67.

[14] TUCKER C S,LLOYD S W,BUSCH R L. Relationships between phytoplankton periodicity and the concentrations of total and unionized ammonia in channel catfish ponds[J]. Hydrobiologia,1984,111(1):75-79.

[15] MULLER-FEUGA A. The role of microalgae in aquaculture:Situation and trends[J]. Journal of applied phycoogy,2000,12(3/4/5):527-534.

[16] 彭聪聪,李卓佳,曹煜成,等. 虾池浮游微藻与养殖水环境调控的研究概况[J]. 南方水产,2010,6(5):74-80.

[17] REN J S,SCHIEL D R. A dynamic energy budget model:Parameterisation and application to the Pacific oyster *Crassostrea gigas* in New Zealand waters[J]. Journal of experimental marine biology & ecology,2008,361(1):42-48.

[18] 姜敬龙,吴云海. 底泥磷释放的影响因素[J]. 环境科学与管理,2008,33(6):43-46.

[19] 王资生. 海水营养盐及其对浮游植物的影响[J]. 盐城工学院学报,2001,14(2):40-43,49.

[20] 赵旭斌,王广军,郁二蒙,等. 两种深度养殖池塘水质和浮游藻类多样性分析[J]. 上海海洋大学学报,2010,19(4):535-539.

[21] 高京,曹晶,储召升,等. 丝状藻响应温度变化的生长及功能特性[J]. 土木与环境工程学报,2020,42(6):196-204.

[22] 杨威,孙凌,袁有才,等. 碱度水平对铜绿微囊藻和四尾栅藻生长和竞争的影响[J]. 农业环境科学学报,2007,26(4):1264-1268.

[23] 孙雪梅,夏斌,过峰,等. 青岛崂山近岸海域浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 渔业科学进展,2013,34(3):46-53.

[24] 张瑜斌,章洁香,詹晓燕,等. 高位虾池养殖过程主要理化因子的变化及水质评价[J]. 水产科学,2009,28(11):628-634.

[25] 王旭娜,江敏,钟锐,等. 凡纳滨对虾养殖池塘中浮游植物群落结构与水质因子的关系[J]. 水产学报,2018,42(11):1787-1803.

[26] 吴利,唐会元,龚云,等. 三峡水库正常运行下库区干流浮游动物群落特征研究[J]. 水生态学杂志,2021,42(1):58-65.

[27] 石晓丹,阮晓红,邢雅因,等. 苏州平原河网区浅水湖泊冬季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析[J]. 环境科学,2008,29(11):2999-3008.

[28] 刘存歧,孔祥玲,张治荣,等. 基于 RDA 的白洋淀浮游植物群落动态特征分析[J]. 河北大学学报(自然科学版),2016,36(3):278-285.

[29] PINILLA G A. Vertical distribution of phytoplankton in a clear water lake of Colombian Amazon (Lake Boa, Middle Caquetá) [J]. Hydrobiologia, 2006,568(1):79-90.

[30] 曾茹,李亚军,何金曼,等. 清澜港近岸海湾春秋两季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. 安徽农业科学,2021,49(10):77-82,100.

[31] WANG Z H,YUAN M L,LIANG Y,et al. 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,2011,30(3):124-131.

[32] SUZUKI Y,MARUYAMA T,NUMATA H,et al. Performance of a closed recirculating system with foam separation,nitrification and denitrification units for intensive culture of eel:Towards zero emission[J]. Aquacultural engineering,2003,29(3/4):165-182.

[33] 刘艳. 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,2011.

[34] AGRAWAL S C. Factors controlling induction of reproduction in algae-review: The text [J]. Folia microbiologica,2012,57(5):387-407.

(上接第 109 页)

[43] SPIŠSKÁ V,PAČESOVÁ D,MÍKOVÁ H,et al. Prenatal exposure to lipopolysaccharide induces changes in the circadian clock in the SCN and AA-NAT activity in the pineal gland[J/OL]. Brain Res,2020,1743[2021

-01-05]. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2020.146952>.

[44] HAHNOVÁ K,PAČESOVÁ D,VOLFOVÁ B,et al. Circadian Dexas1 in rats:Development,location and responsiveness to light [J]. Chronobiol Int,2016,33(2):141-150.