

王小冬,朱 浩,时 旭,等. 高位循环水池塘与普通池塘高温时节浮游植物群落的比较[J]. 江苏农业科学,2014,42(12):279-283.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2014.12.095

高位循环水池塘与普通池塘高温时节 浮游植物群落的比较

王小冬,朱 浩,时 旭,吴宗凡,田昌凤,刘兴国,徐 皓,管崇武

(中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所/农业部渔业装备与工程技术重点实验室,上海 200092)

摘要:研究并比较了高位循环水池塘与普通池塘在高温时节浮游植物群落结构。结果表明,高位循环水池塘中浮游植物总密度约 5.5×10^8 ind./L,普通池塘中浮游植物总密度约 $3 \times 10^7 \sim 7 \times 10^7$ ind./L,总体看来高位循环水池塘的浮游植物密度比普通池塘高 1 个数量级;高位循环水池塘的浮游植物湿质量高达 66.333 mg/L,总体上也比普通池塘高 1 个数量级。在组成方面,高位循环水池塘的主要门类为硅藻门,其湿质量约占总湿质量的 86.33%,组成主要为针杆藻属和小环藻属;普通池塘的组成主要是绿藻门的十字藻属、空星藻属,以及硅藻门的针杆藻属、裸藻门的裸藻属等。此外发现,高位循环水池塘浮游植物的 Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数均明显低于普通池塘,高位循环水池塘的浮游植物种属数量比普通池塘少。对两者的比较表明,高位循环水池塘以硅藻门为绝对优势,可能与其采取增氧、循环水处理措施有关,这表明养鱼池塘浮游植物可以调节硅藻门优势,从而为池塘浮游植物的调控提供了参考,有利于改进池塘的养殖管理。

关键词:高位循环水池塘;普通池塘;浮游植物调控;硅藻门

中图分类号: S181 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2014)12-0279-05

浮游植物是池塘水体重要的初级生产者,其群落结构对维持水质和养殖效果都有重要影响^[1-4]。在当前要求提高养殖产量的前提下,增加养殖密度、提高投饵施肥量成为池塘管理普遍的措施;随着养殖方式和管理措施的改变,池塘中浮游植物的结构也发生了变化;由于池塘中容易暴发蓝藻门水华^[5],不利于水产养殖,从而使得池塘浮游植物调控成为池塘水质调控和管理的一个重要方面。

浮游植物调控有多种方式,如改变养殖模式中养殖品种的搭配,调整施肥投饵措施^[6],利用设备调控或者改变养鱼系统结构^[7-8],调节水体氮、磷、硅等元素组成^[9-10],使用微生物生态制剂^[11]等,这些调控手段在应用中各有优势和限制。生产中有通过增加养殖机械、改变池底性质的方式调节高位养殖池塘水质和水体浮游植物的实例^[12],本研究通过比较高位循环水池塘和普通池塘的浮游植物群落结构,旨在说明高位循环水池塘浮游植物调节的特色和效果,从而为池塘浮游植物调控提供参考。

1 材料与方法

1.1 采样池塘选择

收稿日期:2014-03-03

基金项目:国家科技支撑计划(编号:2012BAD25B01);公益性行业(农业)科研专项(编号:201203083);农业部渔业装备与工程技术重点实验室开放课题(编号:2012007);国家科技基础条件平台建设运行项目。

作者简介:王小冬(1981—),女,湖南隆回人,博士,副研究员,从事水体富营养化研究。E-mail:wangxd1201@163.com。

通信作者:刘兴国,博士,研究员,从事渔业生态环境与工程研究。E-mail:liuxg1223@163.com。

本试验选择的高位循环水池塘为台湾喙棘水产(上海)有限公司位于上海市青浦区试验基地的梭鱼养殖池塘,面积 870 m²。梭鱼是我国沿海珍贵的咸淡水养殖新品种,属于以植物饲料为主的杂食性鱼类,以刮食沉积在底泥表面的底栖硅藻和有机碎屑为主。该池塘为台湾喙棘水产(上海)有限公司结合多年在养殖机械和养殖系统方面的经营与实践经验研制而成,该池塘在 2010 年养殖试验期间的水质和养殖状况参见文献[12],其在试验期间的溶氧维持在 3.5 mg/L 以上,氨氮低于 0.3 mg/L,亚硝酸盐低于 0.4 mg/L,其水色在较长时间内维持比较稳定的褐色。

选择的普通池塘为土池,位于上海市松江区泖港镇的中国水产科学研究院池塘生态工程研究中心,面积 5 000 m²,池塘主养鳊鱼成鱼,配养草鱼、鲢鱼、鳙鱼,采用常规的施肥投饵方案。

1.2 采样池塘养殖与装备

高位循环水池塘养殖系统的具体构成和工作原理见文献[12],它主要通过 4 台水车增氧机和 1 台涌浪机增氧、提水,从而促进水体溶氧含量及水体循环;同时,该系统使用固液分离机、气浮机、水泵等机具,利于水体悬浮物的分离与去除;此外,该系统在池底部使用塑胶布膜将底泥与水体分隔^[12]。与高位循环水池塘不同的是,普通池塘为普通泥质池底,主要安装有 1 台自行研制的以太阳光能为能源的底泥搅动设备以及 1 台增氧机,底泥搅动设备开启后以 1.8 m/min 速度沿池塘对角线做轨迹运动。

1.3 采样

2011 年 7 月 28 日下午 13:00 左右在高位循环水池塘下风口处采集水样,并立刻用 1% 鲁哥氏液固定。采样时天气晴朗,阳光强烈,池塘水色为褐色,透明度 25 cm 左右,表层水

温 30 ℃ 左右。

2012 年 9 月 8 日至 9 月 20 日对普通池塘进行采样。自 2012 年 9 月 8 日起,于每个晴天的上午(一般为 08:30 左右)打开底泥搅动设备,阴雨天气不开该设备,每累计运转 6 h 采集 1 次水样,底泥搅动设备累计运转 54 h。水样采集点位于底泥搅动设备的运行轨迹上,并为表层、中层和底层 3 层采样的混合水样,采样后立刻用 1% 的鲁哥氏液固定。共采集到 10 个不同时间的样品,样品按采样时间依次标记为 0、6、12、18、24、30、36、42、48、54 h 样品。

1.4 浮游植物分析方法

浮游植物种类鉴定和计数:在 10 × 40 倍条件下,利用光学显微镜并参照有关文献^[13-14]鉴定浮游植物种类并计数,计数方法为目镜视野法,一般至少计数 50 个视野,使所得细胞数在 300 个以上;非丝状藻计数细胞数,丝状藻计数藻体个数。每个样品重复计数 2 片,并取 2 片的平均值,2 片的误差不超过 15%。

浮游植物生物量以湿质量表示,湿质量的计算采用体积换算法。在显微镜下测定主要属的大小,每个属随机测定 30 个样本后取平均值,用形态近似的几何体积公式计算细胞体积。或者对形态不规则的种类以及出现频率低的种类采用参考文献中的经验体积值进行换算^[15-16],将体积值(μm³)直接换算为质量值(10⁹ μm³ 约等于 1 mg 鲜藻湿质量)。

计算并比较高位循环水池塘与普通池塘的浮游植物多样性指数 Shannon - Wiener (H')^[17] 和 Pielou 均匀度指数 (J)^[18]:

$$H' = - \sum (n_i/N) \log_2 (n_i/N);$$
$$J = H'/\ln S。$$

式中:S 为样品中生物的种类数,种;n_i 为样品中第 i 种生物的密度,ind./L;N 为样品中生物的总密度,ind./L。

2 个池塘之间的 Shannon - Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数的比较采用单样本 t 检验,使用 SPSS 18.0 软件进行,差异显著性水平选择 α = 0.05。

2 结果与分析

2.1 高位循环水池塘浮游植物

2.1.1 门类组成 在样品中共检测到浮游植物 5 门 16 属 29 种:硅藻门的针杆藻属、小环藻属、冠盘藻属;蓝藻门的平裂藻属、集胞藻属、隐球藻属;绿藻门的栅藻属、纤维藻属、卵囊藻属、衣藻属、胶丝藻属、四角藻属、实球藻属、空星藻属;裸藻门的囊裸藻属;隐藻门的隐藻属。从属的组成看,绿藻门的最多。

2.1.2 密度和湿质量 样品中浮游植物各属、各门的密度和湿质量以及总密度、总湿质量见表 1。可以看出,样品中浮游植物的密度很大,总密度高达 553.40 × 10⁶ ind./L,浮游植物总湿质量高达 66.333 mg/L;湿质量占明显优势的为硅藻门的针杆藻属和小环藻属,其中针杆藻属的优势种为两头针杆藻;细胞密度占优势的门是蓝藻门和硅藻门;生物量占绝对优势的为硅藻门,其占总湿质量的 86.33%,其中针杆藻属和小环藻属分别占总湿质量的 29.48%、54.55%;此外还可看出,蓝藻门的隐球藻属在数量上虽然占据一定优势,但湿质量不占优势。

表 1 高位循环水池塘中浮游植物的密度和湿质量

门	属	密度 (× 10 ⁶ ind./L)	湿质量 (mg/L)
硅藻门	针杆藻属	135.60	19.554
	小环藻属	13.40	36.185
	冠盘藻属	0.56	1.524
	合计	149.60	57.264
蓝藻门	平裂藻属	60.40	0.055
	集胞藻属	63.90	0.033
	隐球藻属	250.70	0.538
	合计	375.00	0.626
裸藻门	囊裸藻属	0.14	0.195
隐藻门	隐藻属	0.95	1.147
绿藻门	栅藻属	4.99	0.801
	纤维藻属	0.27	0.002
	卵囊藻属	9.89	4.117
	衣藻属	2.25	0.602
	胶丝藻属	7.68	0.919
	四角藻属	0.14	0.010
	实球藻属	1.25	0.336
	空星藻属	1.25	0.315
	合计	27.70	7.102
	总计	553.40	66.333

2.2 普通池塘的浮游植物

2.2.1 门类组成 从样品中共检出浮游植物 7 门 59 属 112 种,包括绿藻门 28 属 58 种、硅藻门 13 属 22 种、蓝藻门 8 属 11 种、裸藻门 5 属 15 种、甲藻门 2 属 2 种、隐藻门 2 属 3 种、黄藻门 1 属 1 种。在 59 属藻类中,栅藻属、小球藻属、纤维藻属、蹄形藻属、四星藻属、四角藻属、十字藻属、卵囊藻属、鼓藻属、裸藻属、色球藻属、平裂藻属、针杆藻属、小环藻属、脆杆藻属等 15 属(种)在每次采样中均可采到,出现频率很高,为常见种,其中栅藻属、纤维藻属、四角藻属、裸藻属、色球藻属、脆杆藻属等属的种类较多。从属的组成来看,绿藻门和硅藻门最多。

2.2.2 密度 表 2 列出了各采样时间各门类浮游植物的密度,图 1 为各采样时间各门类浮游植物的密度占总密度的百分比。可以看出,在平均密度组成中以绿藻门最高,为 27.08 × 10⁶ ind./L(占 56.15%);其他依次为蓝藻门 18.93 × 10⁶ ind./L(占 39.25%)、硅藻门 1.34 × 10⁶ ind./L(占 2.78%)、裸藻门 0.42 × 10⁶ ind./L(占 0.87%)、隐藻门 0.28 × 10⁶ ind./L(占 0.58%),甲藻门和黄藻门的细胞密度很低,黄藻门仅在试验初始样品中有检出。

在各样点中,所有样点的浮游植物总密度均达到 × 10⁷ ind./L,不同采样时间的总密度大小依次为 0 h < 12 h < 24 h < 18 h < 6 h < 36 h < 30 h < 42 h < 54 h < 48 h,表明采样后期浮游植物密度有升高趋势。

2.3 湿质量

表 3 为各采样时间的各门类浮游植物湿质量,可以看出,浮游植物总的平均生物量为 8.23 mg/L;在生物量组成中绿藻门的平均生物量最高,为 2.98 mg/L(占 36.21%);其次依次是硅藻门 2.07 mg/L(占 25.15%)、裸藻门 1.60 mg/L(占 19.44%)、甲藻门 0.72 mg/L(占 8.75%)、蓝藻门 0.44 mg/L

表 2 普通池塘各采样时间的各门类浮游植物密度

采样时间 (h)	密度($\times 10^6$ ind./L)							
	绿藻门	蓝藻门	硅藻门	隐藻门	裸藻门	甲藻门	黄藻门	合计
0	29.32	0.85	0.83	0.00	0.44	0.26	0.01	31.71
6	19.00	21.41	0.46	0.99	0.44	1.01	0.00	43.30
12	27.29	10.63	0.63	0.28	0.05	0.09	0.00	38.97
18	19.15	20.78	0.87	0.18	0.09	0.02	0.00	41.09
24	23.73	13.67	0.58	0.32	0.75	0.06	0.00	39.10
30	22.76	22.71	1.22	0.22	0.22	0.00	0.00	47.13
36	25.29	19.13	1.59	0.20	0.39	0.02	0.00	46.61
42	32.53	23.37	2.12	0.25	0.39	0.02	0.00	58.69
48	41.21	25.36	2.75	0.12	0.28	0.00	0.00	69.72
54	30.54	31.43	2.32	0.30	1.11	0.27	0.00	65.98
平均	27.08	18.93	1.34	0.28	0.42	0.18	0.00	48.23

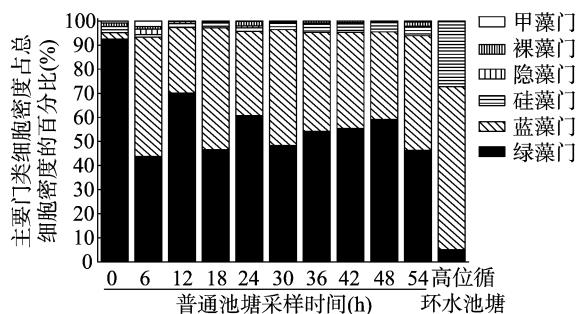


图1 高位循环水池塘及普通池塘各采样时间浮游植物群落细胞密度构成

(占 5.35%)、隐藻门 0.42 mg/L(占 5.10%)。还可以看出,在各样点中,48、54 h 的湿质量均达到 10.00 mg/L 以上,其总湿质量大小为 54 h > 48 h > 42 h > 6 h > 36 h > 24 h > 0 h > 30 h > 12 h > 18 h。

各采样时间各门类浮游植物湿质量占总湿质量的百分比变化见图 2,其中黄藻门很少检出,因此忽略不计。由图 2 可见,普通池塘浮游植物湿质量在各采样时间里以绿藻门、硅藻门、裸藻门等为主。

2.4 优势属

表 4 为各时间采样点湿质量位于前 5 位的优势属,可以看出,前期样品的主要优势属为十字藻属(绿藻门)、针杆藻属(硅

表 3 普通池塘各采样时间的各门类浮游植物湿质量

采样时间 (h)	湿质量(mg/L)							
	绿藻门	蓝藻门	硅藻门	隐藻门	裸藻门	甲藻门	黄藻门	合计
0	2.82	0.04	1.49	0.00	1.35	0.74	0.02	6.46
6	1.86	0.15	0.62	1.55	2.24	2.82	0.00	9.24
12	2.77	0.12	0.64	0.38	0.19	0.26	0.00	4.35
18	1.87	0.40	1.25	0.36	0.22	0.06	0.00	4.16
24	2.77	0.11	0.60	0.60	2.42	0.18	0.00	6.67
30	2.54	0.23	1.61	0.23	1.09	0.00	0.00	5.69
36	2.88	1.19	3.21	0.17	1.20	0.05	0.00	8.70
42	3.71	0.24	2.60	0.29	1.50	1.14	0.00	9.47
48	4.78	0.30	4.99	0.23	0.83	0.00	0.00	11.14
54	3.83	1.64	3.70	0.41	4.95	1.93	0.00	16.46
平均	2.98	0.44	2.07	0.42	1.60	0.72	0.00	8.23

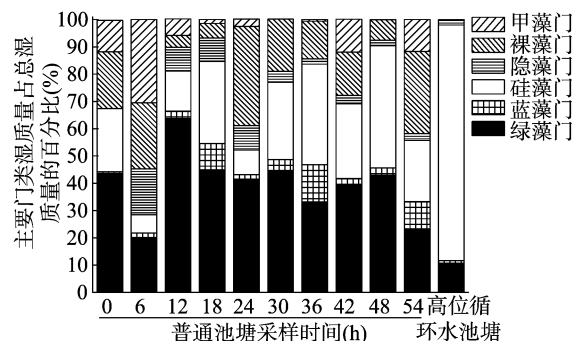


图2 高位循环水池塘及普通池塘各采样时间浮游植物群落湿质量构成

藻门)等,中后期样品的优势属比较集中,主要为十字藻属、空星藻属(绿藻门)、针杆藻属(硅藻门)、裸藻属(裸藻门)等。

2.5 2 个池塘中浮游植物的比较

由图 3 的 2 个池塘 Shannon - Wiener 多样性指数(H')、Pielou 均匀度指数(J)的分布图可知,普通池塘的 H' 、 J 的平均值分别为 3.17、0.79。 t - 检验结果表明,普通池塘的浮游植物多样性指数(H')和均匀度指数(J)均显著高于高位循环水池塘($P < 0.05$)。此外,由表 1 和表 2 的数据对比可知,高位循环水池塘中浮游植物总密度约 5.5×10^8 ind./L,而普通池塘的总密度约 $3 \times 10^7 \sim 7 \times 10^7$ ind./L,总体上高位循环水池塘的浮游植物密度比普通池塘高 1 个数量级。由表 1 和

表 4 普通池塘各时间样品中湿质量位于前 5 位的优势属

属别	湿质量 (mg/L)									
	0 h	6 h	12 h	18 h	24 h	30 h	36 h	42 h	48 h	54 h
十字藻属	1.125	0.620	1.002	0.691	0.831	0.688	0.797	1.116	1.618	0.966
针杆藻属	0.289	0.174	0.155	0.429		0.480	0.936	0.672	1.795	0.788
空星藻属					0.261	0.164	0.286	0.448	0.375	0.788
裸藻属					0.435	0.434		0.436		1.620
扁裸藻属	0.428				0.480		0.303			
隐藻属		0.734		0.191	0.305					
甲藻属	0.374	1.352	0.145							
小环藻属			0.154	0.125					0.410	
颤藻属							0.551			0.730
直链藻属						0.203			0.468	
羽纹藻属	0.224									
胶球藻属			0.132							
陀裸藻属		0.155								
微囊藻属				0.119						
角甲藻属								0.623		

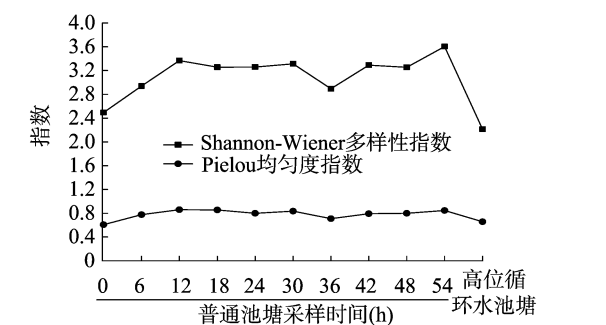


图3 高位循环水池塘及普通池塘各采样时间浮游植物的 Shannon-Wiener多样性指数 (H') 和Pielou 均匀度指数 (J)

表 3 数据的对比可知,高位循环水池塘的浮游植物湿质量总体上也比普通池塘高 1 个数量级。高位循环水池塘细胞密度占优势的门类是蓝藻门、硅藻门(图 1),生物量占绝对优势的为硅藻门,其占总湿质量的比为 86.33% (图 2);用细胞密度表示普通池塘时,主要是绿藻门和蓝藻门(图 1),用湿质量表示时则主要是绿藻门的十字藻属、空星藻属,以及硅藻门的针杆藻属,裸藻门的裸藻属等(图 2、表 4),因此可见蓝藻门湿质量所占比率不大。

3 讨论与结论

3.1 讨论

高位循环水池塘高温时节的浮游植物湿质量以硅藻门的针杆藻属和小环藻属占绝对优势(表 1),这与天然水体浮游植物的一般演替规律不同,天然水体中夏季的浮游植物优势种一般为绿藻门和蓝藻门的植物^[19-20],这表明夏季池塘的浮游植物优势种也可以调节为以硅藻门为主。普通池塘中浮游植物的细胞密度以及不同门类湿质量的组成(图 1、图 2、表 4)与普通水体高温时节的浮游植物群落结构更接近,主要以绿藻门、蓝藻门、硅藻门、裸藻门等为主。对 2 个池塘浮游植物群落结构的比较表明,养殖系统各环节和构件受到高度掌控的高位循环水池塘浮游植物可以控制为以硅藻门为主,并减少有害蓝藻类的密度。一般采用混养鲢、鳙鱼的池塘,可以

达到降低有害蓝藻的目的,但不一定有利于硅藻类生长,比如周小玉等研究发现,三角帆蚌养殖池中适当混养鲢或鳙可以有效控制蓝藻(铜绿微囊藻)的生长,从而促进绿藻(四尾栅藻)的生长^[21]。

高位循环水池塘中浮游植物生物量非常高(表 1),浮游植物总湿质量达 66.333 mg/L,远远超过了普通池塘中浮游植物生物量(表 3),这可能与高位池塘中养殖密度高、投饵施肥多有关。吴振斌等对循环水养殖池中浮游植物的研究也表明,养殖密度的增加促进了浮游植物的生长繁殖^[22]。而如果单独从循环水池塘对浮游植物的处理效果来看,结果可能恰好相反,如杨慧君等对循环水池塘与非循环水池塘的研究表明,循环池塘浮游植物的密度和生物量显著低于非循环池塘^[23]。对不同高产池塘浮游植物的研究表明,其浮游植物生物量也可达到 20~60 mg/L^[2-3],并且可以出现多种优势种群交替,如隐藻、蓝裸甲藻、裸藻、针杆藻和菱形藻、尖头藻、裂面藻、绿球藻类等。对循环流水池塘养殖系统浮游植物的研究^[24]表明,其优势种类可以调节为小环藻、衣藻、隐藻和裸藻等,浮游植物生物量达到 35.3~51.4 mg/L,也比较高。本高位循环水池塘中的梭鱼生长良好,并实现了高产^[12],说明水中浮游植物对梭鱼没有产生不良影响;并且梭鱼的生活习性主要为刮食底泥中藻类和有机碎屑,水体中浮游植物死亡沉降到底泥后极有可能为梭鱼提供了适宜的食物。

高位循环水池塘浮游植物种属数量比普通池塘要少得多,其 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数也比普通池塘小,表明高位循环水池塘中浮游植物丰富度减少。普通池塘浮游植物的 Shannon-Wiener 多样性指数稍高于珠江河口区罗非鱼养殖池塘^[25],而高位循环池较之低些。按照生物多样性阈值的分级评价标准^[26],高位循环水池塘中浮游植物多样性评价等级为Ⅲ级,多样性较好,而普通池塘中为Ⅳ级,多样性丰富。但是由于高位循环水池塘中浮游植物多样性比普通池塘低,其结构可能不稳定。

按照本试验中的高位循环水池塘硅藻的生物量,实际上已经形成了硅藻水华,而根据一般规律,硅藻门植物容易在水温不太高的冬春季占据一定优势^[19-20],汉江和三峡库区的硅

藻水华也出现在春季^[27-28],而本研究的高位循环水池塘在高温季节形成了硅藻门优势,这可能与采取增氧、循环水处理措施有关,应该是多种养殖设备运行后形成的独特环境造成的。本试验中的高位循环水池塘实现了养殖的高产和浮游植物生物量的高水平,而生物量高的浮游植物系统需要较多氮、磷营养盐的供应,高位循环水池塘中营养盐的循环和供应需要进一步研究。此外,可溶解硅是硅藻必需的营养物质^[29],硅藻对硅元素的需求比较多^[30],硅元素在其中的变化和供给情况值得关注。

总之,通过适宜的调控与管理可以将高温时节高位循环水池塘的浮游植物群落调节为硅藻门占优势,并控制蓝藻门生物量,从而实现鱼类的高产,这为养殖池塘中浮游植物调控提供了一定经验。

3.2 结论

高位循环水池塘的浮游植物总密度和湿质量可以维持高水平,且均比普通池塘高 1 个数量级;高位循环水池塘浮游植物的 Shannon - Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数均显著低于普通池塘($P < 0.05$),高位循环水池塘的浮游植物种属数量比普通池塘少;高位循环水池塘的浮游植物优势种类可以控制为硅藻门种类,与普通池塘形成明显不同的优势群落。总体看来,高位循环水池塘以硅藻门为绝对优势可能与其采取增氧、循环水处理措施有关。

参考文献:

- [1] Boyd C E. Summer algal communities and primary productivity in fish ponds[J]. *Hydrobiologia*, 1973, 41(3): 357 - 390.
- [2] 王友亮,姚宏禄,吴乃薇,等. 主养青鱼高产池塘的浮游植物和有机碎屑[J]. *水产学报*, 1994, 18(4): 297 - 304.
- [3] 姚宏禄. 综合养鱼高产池塘的浮游植物[J]. *中国水产科学*, 1996, 3(1): 64 - 71.
- [4] 邓金钗,熊邦喜,张小敏,等. 池塘主养草鱼三种养殖模式浮游植物群落结构的比较[J]. *淡水渔业*, 2012, 42(5): 63 - 67.
- [5] Sevrin - Reyssac J, Pletikoscic M. Cyanobacteria in fish ponds[J]. *Aquaculture*, 1990, 88(1): 1 - 20.
- [6] 王 岩. 海水池塘养殖模式优化:概念、原理与方法[J]. *水产学报*, 2004, 28(5): 568 - 572.
- [7] 刘娅琴,邹国燕,宋祥甫,等. 框式复合型生态浮床对富营养水体浮游植物群落结构的影响[J]. *水生生物学报*, 2010, 34(1): 196 - 203.
- [8] 张小璐,何圣兵,陈雪初,等. 扬水造流技术控藻机制研究[J]. *中国环境科学*, 2011, 31(12): 2058 - 2064.
- [9] Egge J K, Aksnes D L. Silicate as regulating nutrient in phytoplankton competition[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1992, 83: 281 - 289.
- [10] DeNoyelles Jr F, O'Brien W J. Phytoplankton succession in nutrient enriched experimental ponds as related to changing carbon, nitrogen, and phosphorus conditions[J]. *Archiv für Hydrobiologie*, 1978, 84: 137 - 165.
- [11] 李君丰,吴 垠. 不同种类微生态制剂在水产养殖中使用的有效性[J]. *中国微生态学杂志*, 2010, 22(12): 1147 - 1149.
- [12] 郭益顿,顾向军,徐国昌,等. 高位池塘循环水养鱼系统生产性试验总结[J]. *渔业现代化*, 2011, 38(3): 23 - 27.
- [13] 陈宇炜,李朋富, Dokulil M. 浮游藻类三个常见属(颤藻属、直链硅藻属和针杆藻属)学名变更的解释[J]. *湖泊科学*, 2003, 15(1): 85 - 94.
- [14] 胡钧鹤,魏印心. 中国淡水藻类:系统、分类及生态[M]. 北京:科学出版社, 2006.
- [15] 赵 文. 水生生物学[M]. 北京:中国农业出版社, 2005.
- [16] 张党民,何志辉. 内陆水域渔业自然资源调查手册[M]. 北京:农业出版社, 1991.
- [17] Shannon C E, Wiener W J. The mathematical theory of communication[R]. 1949: 117.
- [18] Pielou E C. The measurement of diversity in different types of biological collections[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1966, 13: 131 - 144.
- [19] Sommer U, Gliwicz Z M, Lampert W, et al. The PEG - model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters[J]. *Archiv für Hydrobiologie*, 1986, 106: 433 - 471.
- [20] Reynolds C S. The ecology of freshwater phytoplankton[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1984: 384.
- [21] 周小玉,张根芳,刘其根,等. 鲢、鳙对三角帆蚌池塘藻类影响的围隔实验[J]. *水产学报*, 2011, 35(5): 729 - 737.
- [22] 吴振斌,张世羊,高云霓,等. 循环水养殖池中浮游生物的群落结构及其动态研究[J]. *华中农业大学学报*, 2007, 26(1): 90 - 94.
- [23] 杨慧君,谢从新,何绪刚,等. 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*, 2010, 40(3): 28 - 35.
- [24] 吴映碧,李 谷,陶 玲,等. 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*, 2008, 27(5): 648 - 653.
- [25] 彭聪聪,李卓佳,曹煜成,等. 珠江河口区罗非鱼养殖池塘中浮游微藻的群落特征[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(10): 2019 - 2030.
- [26] 陈清潮,黄良民,尹健强,等. 南海群岛海区浮游动物多样性研究[R]//中国科学院南沙综合科学考察队. 南海群岛及其邻近海区海洋生物多样性研究 I. 北京:海洋出版社, 1994: 42 - 50.
- [27] 杨 霞,刘德富,杨正健. 三峡水库香溪河库湾春季水华暴发藻类种源研究[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(6): 2051 - 2056.
- [28] 殷大聪,黄 薇,吴兴华,等. 汉江水华硅藻生物学特性初步研究[J]. *长江科学院院报*, 2012, 29(2): 6 - 10.
- [29] Werner D. Silicate metabolism in werner ded, the biology of diatoms [M]. London: Black Well Scientific Publications, 1977: 110 - 149.
- [30] 胡胜华,高云霓,张世羊,等. 武汉月湖水体营养物质的分布与硅藻的生态指示[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(3): 856 - 864.