

阳澄湖 3 个湖区鲢鳙控藻效应的比较研究

陈 雯¹, 张俊彪¹, 蔡春芳¹, 何 捷¹, 宋学宏¹, 许国荣², 周静华²

(1. 苏州大学基础医学与生物科学学院, 江苏 苏州 215123;

2. 苏州市相城区农业局, 江苏 苏州 215123)

摘要: 阳澄湖是江苏省重要的淡水湖泊之一, 全湖分为东、中、西 3 个湖区。近年来阳澄湖内加大了鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙(*Aristichthys nobilis*)的控藻力度, 西湖藻华消失, 而中湖和东湖仍偶有藻华出现。为了比较不同湖区水质和浮游植物的差异, 在 3 个湖区分别布设南、北 2 个采样位点, 于 2017 年夏季、秋季及 2018 年春季采集水样进行鲢鳙控藻效应分析。结果表明, 阳澄湖 3 个湖区总氮(TN)、总磷(TP)均达到劣 V 类水质标准, 营养盐浓度由西向东逐渐下降。西湖 3 个季节叶绿素 a(Chl-a)浓度都低于 15 $\mu\text{g/L}$, 透明度最高。调查期间共发现浮游植物 8 门、77 属、177 种, 其中西湖种类数最少, 仅有 8 门、59 属、105 种。从浮游植物多样性看, 阳澄湖水质处于轻污染状态。西湖浮游植物细胞密度年均 $(3.50 \pm 0.49) \times 10^6$ 个/L, 分别约为中湖和东湖的 1/10 和 1/4。中湖和东湖于夏、秋季检出超富营养化(α -ps)指示藻类, 但西湖三季均未检测到。2017 年 10 月, 西湖鲢鳙存鱼密度分别为中湖的 3.8 倍和东湖的 2.3 倍, 规格和肠道饱满度指数显著低于中湖和东湖($P < 0.05$)。研究显示, 现阶段阳澄湖藻华发生与否不完全由营养盐水平决定, 可能还与鲢鳙牧食藻类有关。

关键词: 阳澄湖; 浮游植物; 水质; 水华; 鲢鳙

中图分类号: X826 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2020)04-0073-08

浮游植物是水生态系统中生物量和生产力的重要贡献者, 也是水体中能量流动和物质循环的重要环节(王家利和王芳, 2014)。全球浮游植物的总量低于光合作用生物总量的 1%, 但世界 50% 以上的初级产物由其产生(Field et al, 1998)。浮游植物与水环境因子密切相关, 其组成、细胞丰度和生物量在多种环境因子的综合作用下会呈现一定的动态变化(李秋华等, 2011; 王超等, 2013), 而这种动态变化反过来又能反映水的理化性质及自然环境的变化。国内外现已广泛利用浮游植物来分析和评价水体污染状况与营养水平(Spatharis & Tsirtsis, 2010)。

阳澄湖位于江苏省南部, 属于太湖下游湖群之一, 南北长 17 km, 东西最大宽度 8 km, 面积 117 km²。被两条狭长半岛分为相对独立的西湖(占 26.89%, 水深 1.5~3.0 m)、中湖(占 29.03%, 水深 1.5~3.0 m)和东湖(占 44.08%, 水深 1.7~2.5 m), 在 3 个湖区中, 西湖承接上游河道来水, 历

来水质最差, 东湖最好(桂智凡等, 2011; 沈国华等, 2014), 而且南部水质比北部差。阳澄西湖自 20 世纪 60 年代以后的约 50 年间藻华频发, 2008 年爆发了史上最严重藻华。然而, 近年来阳澄西湖水体透明度明显提高, 藻华消失, 而中湖和东湖仍有藻华出现。本研究通过对 3 个湖区水质及浮游植物的监测和比较, 旨在明确阳澄湖不同湖区水质和浮游植物现状, 结合各湖区鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙(*Aristichthys nobilis*)放养密度、长势及肠道饱满度, 分析鲢鳙控藻效应, 为阳澄湖后续治理及其它同类湖泊的藻华防控提供借鉴。

1 材料和方法

1.1 样点设置及采样方法

在 3 个湖区的南部和北部各选一个点(图 1), 于 2017 年夏季(7 月 13 日)、秋季(10 月 9 日)以及 2018 年春季(3 月 23 日)进行采样。水样用有机玻璃采水器采集于水面下 0.5 m 处, 酸化处理后运输至实验室进行叶绿素 a(Chl-a)、悬浮颗粒物(SS)、化学耗氧量(COD_{Mn})、总氮(TN)、总磷(TP)、磷酸盐磷(PO₄³⁻-P)、亚硝酸盐氮(NO₂⁻-N)、氨氮(NH₄⁺-N)等水质指标的测定。水样保存与测定详细步骤参考《水与废水监测分析方法》(国家环境保护总局, 2002)。pH、水温(T)、溶氧(DO)、塞氏透明度(SD)

收稿日期: 2018-07-23

基金项目: “十二五”农村领域国家科技计划课题(2015BAD13B00)。

作者简介: 陈雯, 1994 年生, 女, 硕士研究生, 研究方向为养殖水体水质调控。E-mail: 2442486336@qq.com

通信作者: 蔡春芳, 1967 年生, 女, 教授, 博导, 主要从事水产养殖学、动物营养与饲料学教科研工作。E-mail: caicf@suda.edu.cn

等指标现场测定。浮游植物采样按《渔业生态环境监测规范(淡水)》(中华人民共和国农业部,2007)方法进行,显微镜下进行定性(韩茂森和束蕴芳,1995;翁建中和徐恒省,2010)、定量(张榆霞等,2014)分析。

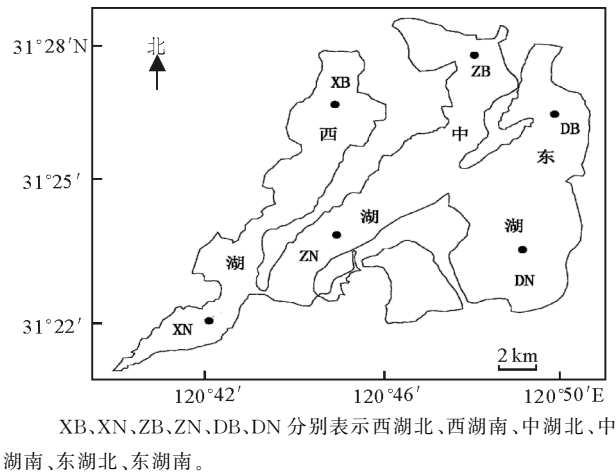


图1 阳澄湖3个湖区的采样点示意图

XB, XN, ZB, ZN, DB, DN respectively denote the northern region and southern region of the west, central and east Yangcheng Lake.

Fig.1 Sampling site locations in Yangcheng Lake

1.2 鲢鳙存鱼量及肠道饱满度

从苏州市农委获得阳澄湖中湖与东湖增殖放流数据,从苏州阳澄西湖专业合作联社获得西湖增殖放流数据,于2017年10月在采样位点放置网目为15.24 cm的丝网,捕捞2龄鲢鳙,称重并解剖观察肠道饱满度。估算存鱼密度:存鱼密度(g/m^3)=规格($\text{g}/\text{尾}$) $\times$ 放流量(尾)/水体体积(m^3)

肠道饱满度评分:0级-肠道中没有食物,即空肠;1级-肠道中仅有残食,约占肠管的1/4;2级-肠道中有少量食物,约占肠管的1/2;3级-肠道中食物约占肠管的3/4;4级-肠道中充满了食物,但肠壁不膨大;5级-肠道中充满了食物,且肠壁膨大。

1.3 数据处理与水质评价

浮游植物群落结构特征采用 Mcnaughton 优势度指数(Y)(陈家长等,2009)、Shannon-Wiener 多样

性指数(H')(Shannon & Weaver, 1963)、Pielou 均匀度指数(J)(Pielou, 1966)和 Jaccard 种类相似性指数(P)(陈家长等,2009)分析,计算公式如下:

$$Y=(N_i/N)\times f_i \tag{1}$$
$$H'=-\sum_{i=1}^S[N_i/N\cdot\ln(N_i/N)] \tag{2}$$
$$J=H'/\ln S \tag{3}$$
$$P=c/(a+b-c) \tag{4}$$

式中: N_i -第*i*种的个体数; N -样品中全部物种的个体数; f_i -第*i*种在所有采样点中出现的频率; S -样点中浮游植物的种类数; a 、 b -分别为两个季节或两个地区调查到的浮游植物种类数; c -两个季节或地区均调查到的浮游植物种类数。

Mcnaughton 优势度指数(Y)评价标准: $Y>0.02$ 时,该浮游植物为采样点内的优势种。Shannon-Wiener 多样性指数(H')评价标准: $H'<1$,重污染; $1\sim3$,中污染; $H'>3$,轻污染或无污染。Pielou 均匀度指数(J)评价标准: $J<0.3$,重污染; $0.3\sim0.5$,中污染; $0.5\sim0.8$,轻污染或无污染。

各湖区存鱼密度及肠道饱满度统计方法采用 SPSS 22.0 进行均值比较,显著性水平设定为 $P<0.05$ 。

根据地表水环境质量标准(GB3838-2002)评价水质状况。

2 结果

2.1 鲢鳙规格与肠道饱满度

分别从西、中、东3个湖区捕获2龄鲢3、3、5尾,鳙3、4、8尾。由捕获的鲢鳙鱼样品平均规格可见,西湖2龄鲢鳙规格仅为中湖与东湖的2/3左右(表1),但由于西湖鲢鳙放养量大,存鱼密度显著高于中湖和东湖($P<0.05$),分别为中湖的3.8倍和东湖的2.3倍。观察比较鲢鳙的肠道饱满度,发现西湖鲢鳙空肠率高,中湖和东湖肠道饱满(图2)。统计分析结果显示,西湖鲢鳙肠道饱满度指数均显著低于中湖与东湖的($P<0.05$)。

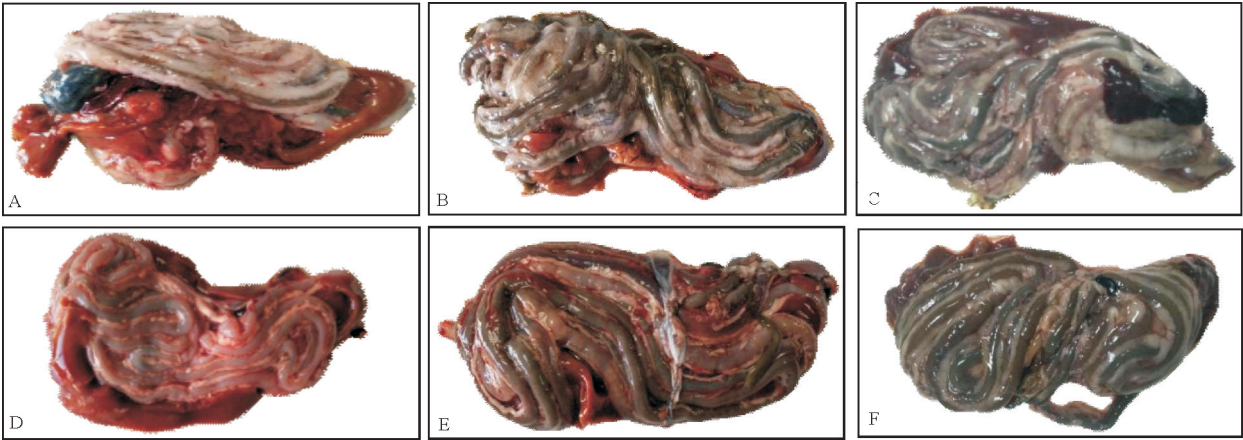
表1 捕获鲢鳙的规格及估计存鱼密度

Tab.1 Size of captured silver and bighead carps and estimated fish density

采样点	鲢			鳙		
	规格/ $\text{g}\cdot\text{尾}^{-1}$	密度/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	饱满度指数	规格/ $\text{g}\cdot\text{尾}^{-1}$	密度/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	饱满度指数
西湖	1364.20 $\pm$ 338.40 ^b	7.50 $\pm$ 1.86 ^a	1.00 $\pm$ 1.73 ^b	1116.00 $\pm$ 9.90 ^b	4.60 $\pm$ 0.04 ^a	1.33 $\pm$ 0.58 ^b
中湖	1709.15 $\pm$ 482.15 ^{ab}	1.26 $\pm$ 0.36 ^b	3.67 $\pm$ 1.53 ^{ab}	2094.23 $\pm$ 647.62 ^a	1.55 $\pm$ 0.48 ^b	4.50 $\pm$ 1.00 ^a
东湖	2020.60 $\pm$ 319.41 ^a	2.27 $\pm$ 0.36 ^b	4.20 $\pm$ 0.84 ^a	1867.48 $\pm$ 422.89 ^a	2.10 $\pm$ 0.48 ^b	4.50 $\pm$ 0.76 ^a

注:同列数据上标不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

Note: Data in the same column with different lowercase letters means significant difference($P<0.05$).



A、B、C、D、E、F 分别为西湖、中湖、东湖鲢和西湖、中湖、东湖鳙的肠道取样实拍。

图 2 阳澄湖不同湖区的鲢鳙肠道饱满度

A, B, C represent the intestine of silver carps from the west, central and east Yangcheng Lake; D, E, F represent the intestine of bighead carps from the west, central and east Yangcheng Lake.

Fig.2 Intestinal fullness of silver carp and bighead carp in different area of Yangcheng Lake

2.2 阳澄湖水水质时空变化特征

根据采样时肉眼观察和现场测定, 阳澄西湖透明度高于中湖和东湖, 且未出现明显水华现象, 而中湖和东湖在夏季水色较绿, 水面有少量的蓝藻聚集而成的水华。

阳澄湖 3 个湖区各采样点水质理化指标的季节变化见图 3。西湖年均 SD 为 0.80 m, 中湖和东湖分别为 0.64 m 和 0.71 m。西湖 3 个季节 Chl-a 浓度都低于 15 μg/L, 远低于中湖和东湖, SS 也相对较低。夏季西湖南部 TP 高于其它监测点, 但北部不高, 低于其中 4 个监测点。秋季西湖南、北湖区 TP 分别为 0.86 mg/L、0.67 mg/L, 高于中湖和东湖。秋季西湖南部的 PO₄³⁻-P 高于其它湖区, 但北部在 3 个季节均不是极值(高于与低于中湖和东湖监测值)。西湖秋季 NH₄⁺-N 高于中湖和东湖, 但绝对值较夏季低得多。

以 3 个季节的平均值来算, 西湖 TN、TP、COD_{Mn} 分别为 3.36、0.37、4.21 mg/L, 中湖分别为 2.90、0.15、5.70 mg/L, 东湖分别为 2.89、0.11、6.02 mg/L, 均达到劣 V 类水标准。TN、TP 从西向东依次降低, COD_{Mn} 则依次升高。西湖、中湖、东湖的 TN/TP 质量比分别约为 9、19 和 26, 阳澄湖全湖 TN/TP 质量比约为 16。

2.3 浮游植物数量、种类及多样性指数

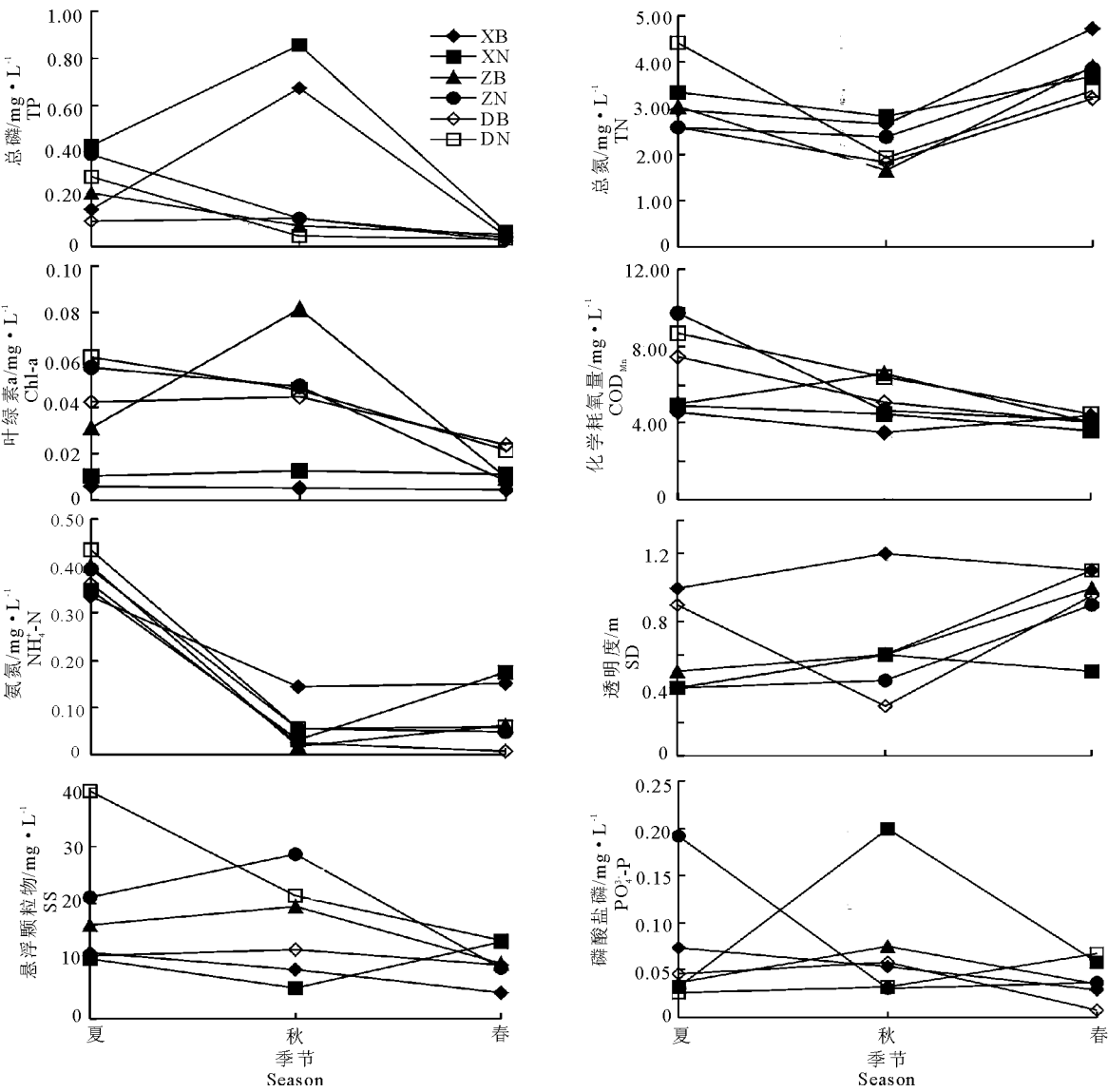
阳澄湖浮游植物细胞密度变动幅度为 (0.34 ± 0.03) × 10⁶ ~ (37.86 ± 4.35) × 10⁶ 个/L, 平均为 (17.47 ± 1.26) × 10⁶ 个/L; 其中, 西湖平均密度为 (3.50 ± 0.49) × 10⁶ 个/L, 中湖为 (34.02 ± 1.32) × 10⁶ 个/L, 东湖为 (14.91 ± 1.96) × 10⁶ 个/L。西湖浮

游植物细胞密度分别约为中湖和东湖的 1/10 和 1/4。夏季浮游植物细胞丰度都高于春、秋季, 西湖增幅较小, 中湖与东湖增幅大, 比西湖高 8 倍以上(图 4)。

调查期间阳澄湖各采样点共鉴定出浮游植物 8 门、77 属、177 种(包括变种和变型)。其中, 绿藻门 29 属、64 种, 占浮游植物总种属的 36.16%, 硅藻门 18 属、37 种, 蓝藻门 13 属、28 种, 裸藻门 5 属、28 种, 金藻门 4 属、8 种, 甲藻门 3 属、5 种, 隐藻门 2 属、3 种, 黄藻门 3 属、4 种。阳澄西湖种类数最少, 共有 8 门、59 属、105 种, 其中绿藻门、21 属、39 种, 占浮游植物总种属的 37.14%, 硅藻门 13 属、21 种, 蓝藻门 12 属、22 种。中湖共有 8 门、58 属、116 种, 东湖共有 8 门、69 属、143 种。根据年 Jaccard 种类相似性指数结果可知, 西湖与中湖的相似性最低(0.51), 中湖与东湖的相似性最高(0.64)。

调查共检测出浮游植物优势种 8 门、23 种, 西湖优势种数(14 种) 低于中湖(15 种) 与东湖(21 种)。虽然 3 个湖区优势种有一定的差异, 但均表现为秋季优势种数高于春、夏季。夏季蓝藻是主要优势种, 春、秋季硅藻与绿藻同为占比较大的优势种(表 2)。通过镜检比较浮游植物种类与细胞大小, 发现西湖浮游植物形态大小与中湖、东湖无明显差异, 大型藻类与小型藻类呈现季节性更替, 阳澄湖浮游植物未出现明显小型化现象。

由表 2 可见, 西湖三季均无超富营养化(α-ps) 指示种, 秋季出现清洁水体指示物种黄丝藻(Y = 0.1)。中湖与东湖在春季未出现超富营养化指示种, 且检测出喜清洁的金藻门锥囊藻, 而夏季和秋节出现大量超富营养化指示物种, 以夏季为最高。



XB、XN、ZB、ZN、DB、DN 分别表示西湖北、西湖南、中湖北、中湖南、东湖北、东湖南。

图3 阳澄湖各采样点水质理化指标的季节变化

XB, XN, ZB, ZN, DB, DN respectively denote the northern region and southern region of the west, central and east Yangcheng Lake.

Fig.3 Seasonal variation of water quality parameters at each station in Yangcheng Lake

阳澄湖全湖 H' 变化范围为 2.08~3.94, 均值为 3.03, 处于轻污染状态。夏季西湖 H' 较低, 但最低值出现在中湖。秋季西湖南北的 H' 均低于中湖和东湖, 但春季 H' 较高, 其中北部(3.60)高于平均值, 南部(3.02)接近平均值。 J 变化范围为 0.52~0.85, 均值 0.72。西湖夏季和秋季 J 值位于中湖和东湖之间, 春季全湖 J 值最高值出现在西湖北部, 最低值出现在西湖南部(表 3)。

3 讨论

3.1 鲢鳙对营养盐与叶绿素 a 浓度相关性的干扰

已有研究表明, TP 浓度在 0.1~1 mg/L 范围内, TN/TP 质量比 < 29 时容易爆发藻华(李小平,

2002)。本次调研期间, 西湖、中湖和东湖的 TN/TP 质量比分别为 9、19 和 26, 表明阳澄湖 3 个湖区营养水平均满足藻华发生的条件, 而且由 TN/TP 比驱动的蓝藻水华风险在西湖最高。比较 3 个湖区营养盐的绝对值, 发现除了秋季西湖 2 个位点的监测值同时高于中湖和东湖的监测值, 其它季节西湖的 2 个位点的营养盐均有不是极值的情况(图 3)。上述结果表明阳澄湖藻华爆发与否不完全受制于营养盐浓度。

杨惠等(2016)研究认为西湖 TP、TN 等营养盐含量一直高于中湖与东湖, 在 3 个湖区中, 西湖历史上藻华爆发也最频繁、最严重。本研究结果表明,

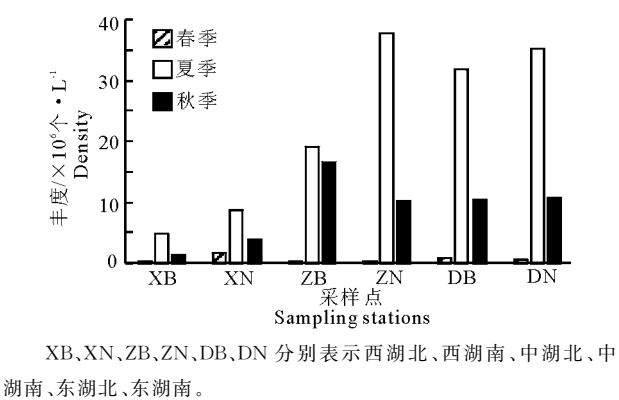


图 4 阳澄湖浮游植物细胞密度时空变化

XB, XN, ZB, ZN, DB, DN respectively denote the northern region and southern region of the west, central and east Yangcheng Lake.

Fig.4 Spatial-temporal variation of phytoplankton abundance at each station in Yangcheng Lake

目前西湖 TN、TP 年均值仍高于其他 2 个湖区(图 3),但其 3 个季节的 Chl-a 浓度均小于15 $\mu\text{g/L}$,远低于中湖和东湖,甚至低于藻华爆发的临界值(崔力拓和李志伟,2005),细胞密度分别约为中湖和东湖的 1/10 和 1/4。这可能与西湖鲢鳙密度较高有关(表 1)。鲢鳙以水体中的有机碎屑和浮游生物作为食物来源,其滤食活动可降低水中悬浮有机颗粒和藻类数量,增加水体透明度(Ke et al,2009)。西湖鲢鳙放流密度约为中湖的 4 倍、东湖的 2.5 倍,加上西湖防逃防偷措施比较周密,存鱼差距可能更大。由于西湖鲢鳙密度高,对浮游植物的牧食压力超过了浮游植物生长潜力,导致浮游植物细胞密度和 Chl-a 浓度维持在较低水平,而低密度的浮游植物又使鲢鳙处于饥饿状态且生长缓慢(图 2),同为 2 龄鲢鳙,其规格远低于中湖和东湖(表 1)。

表 2 阳澄湖浮游植物优势种的季节变化

Tab.2 Seasonal variation of phytoplankton dominant species in Yangcheng Lake

优势种	指示性	西湖			中湖			东湖		
		夏季	秋季	春季	夏季	秋季	春季	夏季	秋季	春季
蓝藻门 Cyanophyta										
席藻 <i>Phormidium</i> sp.	α -ps				0.14	0.03		0.23	0.09	
色球藻 <i>Chroococcus</i> sp.	α -ms		0.03		0.17	0.03			0.08	
微囊藻 <i>Microcystis</i> sp.	α -ms	0.14			0.33	0.11		0.18	0.04	
颤藻 <i>Oscillatoria</i> sp.	α -ms								0.08	
鱼腥藻 <i>Anabaena</i> sp.	α -ms							0.07	0.02	
念球藻 <i>Nostoc</i> sp.	β -ms	0.02			0.04			0.03		
裸藻门 Euglenophyta										
扁裸藻 <i>Phacus</i> sp.	α -ps					0.03				
裸藻 <i>Euglena</i> sp.	α -ms		0.11	0.08		0.02	0.02		0.04	0.02
隐藻门 Cryptophyta										
隐藻 <i>Cryptomonas</i> sp.	α -ms		0.14	0.37		0.08	0.17		0.06	0.18
甲藻门 Dinophyta										
多甲藻 <i>Peridinium</i> sp.	α -ms			0.08			0.24			0.15
绿藻门 Chlorophyta										
小球藻 <i>Chlorella</i> sp.	α -ms	0.30	0.33	0.09	0.18	0.11	0.26	0.10	0.09	0.26
卵囊藻 <i>Oocystis</i>	α -ms			0.02				0.02	0.02	
新月藻 <i>Closterium</i> sp.	β -ms								0.03	
十字藻 <i>Crucigenia</i> sp.	β - α -ms					0.02	0.02		0.02	
四角藻 <i>Tetraedron</i> sp.	β - α -ms								0.02	
栅藻 <i>Scenedesmus</i> sp.	β - α -ms					0.02		0.02	0.03	0.02
纤维藻 <i>Ankistrodesmus</i> sp.	β - α -ms			0.05						0.06
硅藻门 Bacillariophyta										
直链藻 <i>Melosira</i> sp.	β - α -ms	0.31	0.10	0.09	0.02	0.43	0.03	0.07	0.22	0.03
小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	β - α -ms	0.09	0.15	0.10	0.03	0.05	0.15		0.03	0.15
针杆藻 <i>Synedra</i> sp.	β - α -ms	0.04			0.02			0.09	0.04	
金藻门 Xanthophyta										
锥囊藻 <i>Dinobryon</i> sp.	o -s			0.02			0.04			0.02
黄藻门 Chrysophyta										
拟气球藻 <i>Botrydiopsis</i> sp.	o -s							0.06		
黄丝藻 <i>Tribonema</i> sp.	o -s		0.10							

注:超富营养型: α -ps; 富营养型: a -ms, β - a -ms; 中营养型: β -ms; 寡营养型: o -s。

Note: hypereutrophic: α -ps; eutrophic: a -ms, β - a -ms; mesotrophic: β -ms; oligotrophic: o -s.

表 3 阳澄湖浮游植物多样性指数季节变化

Tab.3 Seasonal variation of phytoplankton diversity indices in Yangcheng Lake

指数	季节	XB	XN	ZB	ZN	DB	DN	各季均值	全年均值
H'	夏季	2.44	2.66	3.07	2.08	3.46	3.61	2.89	3.03
	秋季	2.84	2.56	2.85	2.86	3.94	3.93	3.16	
	春季	3.60	3.02	3.30	2.92	3.40	3.03	3.21	
J	夏季	0.66	0.65	0.68	0.52	0.74	0.74	0.67	0.72
	秋季	0.79	0.74	0.68	0.65	0.83	0.85	0.76	
	春季	0.83	0.64	0.67	0.75	0.72	0.70	0.72	

注:XB、XN、ZB、ZN、DB、DN 分别表示西湖北、西湖南、中湖北、中湖南、东湖北、东湖南。
Note: XB, XN, ZB, ZN, DB, DN respectively denote the northern region and southern region of the west, central and east Yangcheng Lake.

中湖和东湖鲢鳙放养密度低,其饵料相对充足,因此生长速度快,但由于浮游植物的生长速度快,3~6 h即可繁殖 1 代(李庆彪等,1999),条件适宜时浮游植物生长就可能失控。因此,尽管中湖和东湖的营养水平低于西湖,仍时有藻华发生。本研究结果暗示鲢鳙放养密度足够高时才可控制藻华,与 Wang 等(2016)的研究结论一致。

3.2 鲢鳙操控对水质的影响

以往的研究表明,1994 年阳澄湖的 COD_{Mn}、TN、TP 分别为 5.09、2.64、0.04 mg/L,2003 年分别为 6.10、2.68、0.10 mg/L(潘红玺和吉磊,1997;张春艳,2006);与往年相比,阳澄湖目前上述指标未见明显下降。就西湖而言,1994 年检测到 COD_{Mn}、TN、TP 分别为 5.04、3.55、0.05 mg/L,2003 年分别为 6.60、3.23、0.10 mg/L,也没有明显改善。上述结果提示阳澄湖后续治理应加强氮、磷消减。

3.3 鲢鳙操控对藻相的影响

丁娜等(2015)报告 2014 年阳澄西湖蓝藻优势度为 0.39。本研究期间,阳澄西湖夏季蓝藻优势度又有所降低,只有 0.16,低于中湖(0.68)与东湖(0.51)。从特征藻类来讲,中湖与东湖夏、秋季出现了超富营养化(α -ps)指示藻类(况琪军等,2005),但西湖全年未检出。西湖秋季喜清洁水体的黄藻门数量增加,而中湖和东湖较少。从藻相来看,西湖水质优于中湖和东湖。

多样性指数在很多情况下可以很好地反映水体污染状况,指数越高,群落结构越复杂,稳定性越大,水质越好(Shannon & Weaver, 1963)。均匀度指数也是评价水质的一种重要指标,指数越高,群落稳定性大,水质越好(Pielou, 1966)。当 $H' > 3$ 、 J 值处于 0.5~0.8 时水质处于轻污染状态,阳澄湖全湖平均 H' 值为 3.03, J 值为 0.72(表 3),提示水质处于轻污染状态(周凤霞,2006)。

4 结论

- (1)阳澄湖 3 个湖区营养水平由西向东逐渐下降,均达到劣 V 类水标准。
- (2)西湖藻密度分别约为中湖和东湖的 1/10 和 1/4,Chl-a 浓度低于藻华爆发的临界值,且夏季蓝藻优势度低,表明藻华发生与否不完全受制于营养盐浓度,可能还受到鲢鳙牧食的干扰。
- (3)与历年文献资料相比,阳澄湖营养盐水平下降不明显,后续治理应加大氮磷的输入管控。

参考文献

陈家长, 孟顺龙, 尤洋, 等, 2009. 太湖五里湖浮游植物群落结构特征分析[J]. 生态环境学报, 18(4): 1358 - 1367.

崔力拓, 李志伟, 2005. 洋河水库“水华”形成的关键因子[J]. 农业环境科学学报, 24(S1): 141 - 143.

丁娜, 周彦锋, 宋江腾, 等, 2015. 阳澄湖浮游植物群落结构特征及其与水环境因子的关系[J]. 上海海洋大学学报, 24(5): 702 - 711.

桂智凡, 薛滨, 姚书春, 等, 2011. 阳澄湖水质现状及原因探讨[J]. 地理科学, 31(12): 1487 - 1492.

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.

国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局, 2002. 地表水环境质量标准(GB3838 - 2002)[S]. 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.

况琪军, 马沛明, 胡征宇, 等, 2005. 湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展[J]. 安全与环境学报, 5(2): 87 - 91.

李秋华, 陈丽丽, 夏品华, 等, 2011. 贵州百花湖麦西河河口浮游植物群落结构及与环境因子关系[J]. 湖泊科学, 23(4): 612 - 618.

李小平, 2002. 美国湖泊富营养化的研究和治理[J]. 自然杂

- 志, 24(2): 63 - 68.
- 潘红玺, 吉磊, 1997. 阳澄湖若干水质资料的分析与评价[J]. 湖泊科学, 9(2): 187 - 191.
- 沈国华, 张仁泉, 高晓平, 2014. 阳澄湖水质变化趋势分析[J]. 水资源研究, (3): 41 - 43.
- 王家利, 王芳, 2014. 盐湖微小型浮游植物多样性研究进展[J]. 生态学报, 34(2): 282 - 293.
- 王超, 赖子尼, 李新辉, 等, 2013. 西江下游浮游植物群落周年变化模式[J]. 生态学报, 33(14): 4398 - 4408.
- 翁建中, 徐恒省, 2010. 中国常见淡水浮游藻类图谱[M]. 上海: 上海科学技术出版社.
- 杨惠, 陈江, 谈剑宏, 2016. 阳澄湖入湖河道水质变化及污染物通量分析[J]. 水资源保护, 32(2): 129 - 132.
- 张春艳, 2006. 阳澄湖镇水质现状分析及保护对策[D]. 南京: 南京农业大学.
- 张榆霞, 金玉, 施择, 等, 2014. 富营养化水体藻类显微镜计数方法改进研究[J]. 福建分析测试, 23(1): 13 - 16.
- 中华人民共和国农业部, 2007. 渔业生态环境监测规范第 3 部分: 淡水(SC/T 9102.3 - 2007)[S]. 北京: 中国农业出版社.
- 周凤霞, 2006. 生物监测[M]. 北京: 化学工业出版社.
- Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, et al, 1998. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components[J]. Science, 281: 237 - 240.
- Ke Z X, Ping X, Guo LG, et al, 2009. Impacts of two bio-manipulation fishes stocked in a large pen on the plankton abundance and water quality during a period of phytoplankton seasonal succession[J]. Ecological Engineering, 35(11): 1610 - 1618.
- Pielou E C, 1966. The measurement of diversity in different types of biological collections[J]. Journal of Theoretical Biology, 13(1): 131 - 144.
- Shannon C E, Weaver W, 1963. The mathematical theory of communication[M]. Urbana: The University of Illinois Press.
- Spatharis S, Tsirtsis G, 2010. Ecological quality scales based on phytoplankton for the implementation of water framework directive in the Eastern Mediterranean[J]. Ecological Indicators, 10(4): 840 - 847.
- Wang Y, Gu X, Zeng Q, et al, 2016. Contrasting response of a plankton community to two filter-feeding fish and their feces: An in situ, enclosure experiment[J]. Aquaculture, 465: 330 - 340.

(责任编辑 万月华)

Comparative Study on Algal Control by Silver Carp and Bighead
Carp in Three Regions of Yangcheng Lake

CHEN Wen¹, ZHANG Jun-biao¹, CAI Chun-fang¹, HE Jie¹,
SONG Xue-hong¹, XU Guo-rong², ZHOU Jing-hua²

(1.School of Biology & Basic Medical Science, Soochow University,
Suzhou 215123,P.R.China;
2.Xiangcheng Agricultural Bureau of Suzhou City, Suzhou 215123, P.R.China)

Abstract: Yangcheng Lake is one of the most important freshwater lakes in Jiangsu Province and it has three sections: east, central and west. In recent years, the release of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) and bighead carp (*Aristichthys nobilis*) to Yangcheng Lake has been increased in order to control algal blooms. Algal blooms have disappeared in west Yangcheng Lake, but occur occasionally in the central and east sections. In this study, we analyzed the effectiveness of releasing filter-feeding fish for controlling algae in the three sections of Yangcheng Lake by comparing differences in the phytoplankton community and water quality. Six sampling stations were set in the north and south of each lake section and the investigation was conducted in summer and autumn of 2017, and spring of 2018. Results show that the concentration of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in the three sections only met the Class V (inferior) quality standard, and nutrient concentrations gradually decreased from west to east. The concentrations of Chlorophyll-a (Chl-a) in west Yangcheng Lake were lower than 15 $\mu\text{g/L}$ for the three seasons, where the Secchi depth was the highest. A total of 177 phytoplankton species from 77 genera and 8 phyla were observed during the investigation, with the lowest species number in west Yangcheng Lake (105 species, 59 genera, 8 phyla). The average algal density was $(3.50\pm0.49) \times 10^6$ cells/L, about 1/10 and 1/4 of that in the middle and east sections. Phytoplankton community diversity indicated that Yangcheng Lake was lightly polluted. Algae species indicating hypereutrophication were detected in central and east Yangcheng Lake in summer and autumn, but were not detected in west Yangcheng Lake. The density of stocked silver carp and bighead carp in west Yangcheng Lake was 3.8 times higher than that in the central section and 2.3 times higher than that in the east section in October 2017, and fish size and the intestinal fullness index of silver and bighead carps in the west Yangcheng Lake were significantly lower than those of in the central and east sections ($P<0.05$). These results indicate that the occurrence of algal blooms in Yangcheng Lake were not determined entirely by nutrient levels and likely related to algae grazing by silver and bighead carps.

Key words: Yangcheng Lake; phytoplankton; water quality; algal blooms; silver carp and bighead carp