

文章编号: 1674 - 5566(2016)03 - 0422 - 09

DOI:10.12024/jsou.20150301368

太湖控藻网围内、外及工程示范区浮游植物群落结构周年变化特征对比研究

张永红¹, 刘其根¹, 孔优佳², 陈立婧¹

(1. 上海海洋大学 省部共建水产种质资源发掘与利用教育部重点实验室, 上海 201306; 2. 江苏省太湖渔业管理委员会, 江苏 常州 213161)

摘要: 2013 年 7 月至 2014 年 6 月对太湖控藻网围内、外和工程示范区 3 个区域浮游植物进行了采样调查, 分析了浮游植物的群落结构特征及其与环境因子的关系。共鉴定出浮游植物 158 种, 隶属 7 门 80 属。控藻网围内有 11 种优势种, 网围外 9 种, 工程示范区 5 种, 网围内与网围外优势度最大的优势种均为不定微囊藻 (*Microcystis incerta*), 工程示范区优势度最大的为螺旋颗粒直链藻 (*Melosira granulate var. angustissima*)。浮游植物现存量网围外 > 网围内 > 工程示范区。两两比较 LSD 结果显示, 浮游植物生物密度年均值在控藻网围内、外存在显著差异 ($P < 0.05$), 控藻网围内、外与工程示范区则均存在极显著差异 ($P < 0.01$)。浮游植物生物量年均值在控藻网围内、外与工程示范区之间都存在极显著差异 ($P < 0.01$), 但是网围内与网围外则无显著差异。冗余分析 (RDA) 以及两变量相关分析 (Pearson) 结果均显示水温、*Chl. a*、 COD_{Mn} 是影响太湖浮游植物群落结构的主要环境因子。

关键词: 太湖; 控藻网围; 工程示范区; 浮游植物; 群落结构

中图分类号: S 932

文献标志码: A

太湖地处武进西南部与宜兴东北部相接处, 为苏南第二大湖泊, 具有十分重要的地理位置^[1-2], 是一个有着水源地、农业灌溉、运输、旅游及水产养殖等多重功能的浅水湖泊^[3]。自 20 世纪 90 年代至 2006 年间, 因受到工农业及生活污水的污染以及过度养殖的影响, 太湖水质不断变坏, 富营养化严重。因此太湖水环境的保护及生态修复受到国家的重视, 针对太湖开展了一系列的治理措施, 比如在太湖利用浮式网围混养鲢鳙的养殖办法控制蓝藻, 以期达到以渔控藻、生态治水的效果; 在太湖北部工程示范区内实施了生态清淤工程; 另外还有退田还湖工程、岸线整治工程等项目。目前, 已有不少关于太湖浮游植物、浮游动物的调查研究^[4-5], 也有学者探讨了控藻网围对枝角类^[6]及底栖生物^[7]的影响。但是关于控藻网围内、外与工程示范区浮游植物的对

比研究尚未见报道。

浮游植物作为水体中的初级生产者, 具有生命力强、繁殖快、对环境条件变化反应敏感等特点, 浮游植物的分布与水环境之间有着十分密切的关系, 其种类组成、生物量等群落特征是水环境质量的重要标志^[8-9]。因此, 浮游植物可作为水质变化的指示生物。本实验在太湖控藻网围内、外以及工程示范区对浮游植物的群落结构进行了对比调查, 了解了太湖这 3 个区域浮游植物不同种类生物密度、生物量以及物种多样性的差异。希望能为太湖的富营养化治理、水质改善以及生态调控工程提供基础资料和生物学依据。

1 材料与方法

1.1 控藻网围结构

鲢鳙鱼控藻网围的网围结构由聚乙烯有结

收稿日期: 2015-03-20 修回日期: 2015-05-29

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07101 - 007); 上海市重点学科建设项目 (S30701); 上海高校知识服务平台上海海洋大学水产动物遗传育种中心 (ZF1206)

作者简介: 张永红 (1990—), 女, 硕士研究生, 研究方向为浮游植物生态学。E-mail: xiaobai1108@163.com

通信作者: 陈立婧, E-mail: ljchen@shou.edu.cn

网片、刚性无缝钢管等组成,设置网围高度高于水深 1.5 m,双层网围结构,外层网目孔径 3 cm,内层网目孔径 0.71 mm,防止养殖鱼类逃逸。网围内鲢放养密度为 1 267 ~ 1 667 尾/hm²,每尾重量为 45 ~ 83 g,1 龄鱼种;鳙放养密度为 867 ~ 1 267 尾/hm²,每尾重量为 167 ~ 250 g,1 龄鱼种。鲢鳙鱼的放养时间均为 2013 年 7 月至 2014 年 6 月。

1.2 采样点设置

采样共置 9 个站点(图 1):S1(31°33'32.5" N,119°47'39.2"E)、S2(31°33'26.1"N,119°47'49.7"E)、S3(31°33'19.4"N,119°57'59.9"E)位于控藻网围内;S4(31°33'12.9"N,119°47'40.1"E)、S5(31°33'10.2"N,119°47'52.1"E)、S6(31°33'19.7"N,119°47'29.6"E)位于控藻网围外;S7(31°40'0.7"N,119°51'13.4"E)、S8(31°40'55.7"N,119°50'3.7"E)、S9(31°40'16.8"N,119°48'52.8"E)位于工程示范区。其中控藻网围总面积为 0.5 km²,工程示范区总面积为 15.9 km²,2013 年 7 月至 2014 年 6 月,每月中下旬采样 1 次。其中,由于 12 月水太浅无法行船,故未进行采样。

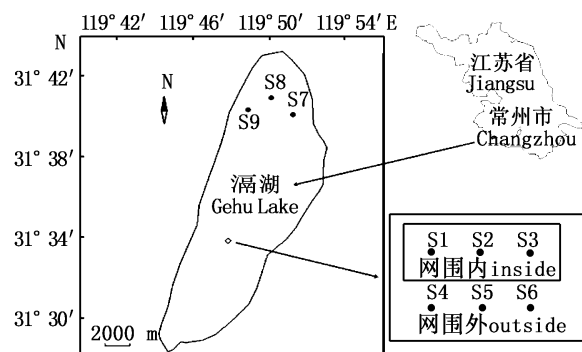


图 1 溇湖采样站点图

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Lake Gehu

1.3 样品采集与鉴定

由于溇湖平均水深为 1.27 m,不足 1.5 m,所以用 5L 柱状采水器采集表层(水面下 0.5 m)水样 10 L,混匀后取 1 L 加入 10 mL 鲁哥氏碘液及 1% 的甲醛溶液固定,带回实验室沉淀 48 h 后,浓缩至 50 mL 保存进行镜检^[10]。浮游植物种类鉴定主要参考胡鸿钧和毕列爵等^[11-12]。

使用 YSI 6600EDS 现场测定水温(T)、溶解氧(DO)、pH 等水质因子,使用测深仪测定水深(D)、使用赛氏盘测定透明度(SD),同时用采水

器采集 1 L 水带回实验室后分析总氮(TN)、总磷(TP)等水质因子。

1.4 数据处理和分析

$$\text{种类优势度}(Y): Y = (N_i/N)f_i \quad (1)$$

式中: N_i 为第 i 种的个体数, N 为总个体数, S 为总物种数, f_i 为第 i 种的出现率。 $Y > 0.02$ 为优势种^[13]。

采用 Shannon-Wiener 物种多样性指数(H'), Pielou 物种均匀度指数(J), Margalef 物种丰富度指数(D)进行浮游植物群落组成的多样性分析。

$$H' = - \sum (N_i/N) \ln(N_i/N) \quad (2)$$

$$J = H' / \ln S \quad (3)$$

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

式中: H' 为香农威尔指数; S 为样品中物种的总数, N_i 为第 i 种物种个体数^[14]。

$$\text{Jaccard 相似性指数}: S_j = c / (a + b - c) \quad (5)$$

式中: a 为一个地区的物种种类数总和; b 为另一个地区的物种种类数总和; c 为两地区共有物种总和。当 S_j 值为 0 ~ 0.25 时,为极不相似;当 S_j 值为 0.25 ~ 0.50 时,为中等不相似;当 S_j 值为 0.50 ~ 0.75 时,为中等相似;当 S_j 值为 0.75 ~ 1.00 时,为极相似^[15]。

用 SPSS19.0^[16] 软件对所获得的物种与环境的数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和多变量相关分析(Pearson)。利用 CANOCO of Windows 4.5^[17] 软件对浮游植物和环境因子数据进行冗余分析(RDA)。

2 结果与分析

2.1 溇湖控藻网围内、外以及工程示范区水质因子的对比

由表 1 可知,工程示范区水温年均值略高于控藻网围内、外,可能由于工程示范区的采样时间均接近午后(12:00 - 14:00),而网围内、外均为上午(9:00 - 10:00),故温度高于控藻网围内、外。工程示范区透明度明显高于控藻网围内、外,这是因为北区实行了清淤工程。工程示范区 COD_{Mn} 的年均值明显小于控藻网围内外, COD_{Mn} 为一个重要的而且能较快测定的有机物污染参数,工程示范区数值小表明其有机物污染程度小于控藻网围内外区域。Chl. a 的年均值也是工程示范区明显小于控藻网围内外,这与工程示范区浮游植物现存量小于控藻网围内外相一致。pH、

总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₄-N)等水质因子 在3个区域中没有显著差异。

表1 漏湖3个区域理化因子的年均值

Tab.1 The annual average physicochemical indexes of 3 regions in Gehu Lake

理化因子 physicochemical index	网围内 inside	网围外 outside	工程示范区 demonstration project area
pH	7.98 ± 0.17	8.23 ± 0.04	7.87 ± 0.22
水温 T/°C	19.22 ± 0.11	19.67 ± 0.13	20.04 ± 0.23
溶氧 DO/(mg/L)	9.31 ± 0.08	9.82 ± 0.31	9.13 ± 0.10
透明度 SD/m	0.25 ± 0.01	0.27 ± 0.01	0.34 ± 0.01
水深 D/m	1.50 ± 0.06	1.53 ± 0.02	2.40 ± 0.19
总氮 TN/(mg/L)	2.40 ± 0.09	2.25 ± 0.04	2.34 ± 0.05
总磷 TP/(mg/L)	0.34 ± 0.12	0.30 ± 0.05	0.19 ± 0.04
硝酸盐氮 NO ₃ -N/(mg/L)	0.70 ± 0.02	0.68 ± 0.05	0.89 ± 0.05
氨氮 NH ₄ -N/(mg/L)	0.50 ± 0.03	0.43 ± 0.01	0.53 ± 0.13
高锰酸盐指数 COD _{Mn} /(mg/L)	5.46 ± 0.54	5.43 ± 0.43	4.16 ± 0.11
叶绿素 a 含量 Chl. a(μg/L)	39.50 ± 3.10	47.50 ± 0.80	22.40 ± 3.80

2.2 漏湖控藻网围内、外以及工程示范区浮游植物种类组成的对比

漏湖控藻网围内共鉴定出浮游植物 139 种,网围外 137 种,工程示范区 117 种,其中 3 区共有种类为 110 种。3 区浮游植物种类的 S_j 相似性指数:网围内与网围外为 0.85、网围内与工程示范区为 0.75、网围外与工程示范区为 0.75。也即控藻网围外浮游植物种类极为相似,控藻网围内、外与工程示范区浮游植物种类皆为中等相似。

控藻网围内优势种共 11 种,其中蓝藻门 5 种,硅藻门 2 种,绿藻门 4 种;控藻网围外优势种

共有 9 种,其中蓝藻门 5 种,绿藻门 4 种;工程示范区优势种共有 5 种,其中硅藻门 2 种,绿藻门 3 种。由表 2 可知,控藻网围内外优势种多为蓝绿藻,尤其网围外优势种全部为蓝绿藻,其中这 2 个区域中优势度排前三位的优势种均为蓝藻门的不定微囊藻、细小平裂藻(*Merismopedia minima*)、点状平裂藻(*Merismopedia punctata*);而工程示范区没有出现蓝藻门的优势种,优势种全部为硅藻门和绿藻门的种类,其中优势度最高的为硅藻门的螺旋颗粒直链藻。

表2 漏湖3个区域的优势种及优势度

Tab.2 The dominant species in 3 regions of Gehu Lake

门 phylum	优势种 species	优势度 dominance		
		网围内 inside	网围外 outside	工程示范区 demonstration project area
蓝藻门	不定微囊藻 <i>Microcystis incerta</i>	0.17	0.17	
	微囊藻属未定种 <i>Microcystis</i> sp.	0.04	0.04	
	细小平裂藻 <i>Merismopedia minima</i>	0.06	0.08	
	点状平裂藻 <i>Merismopedia punctata</i>	0.06	0.06	
	束丝藻属未定种 <i>Aphanizomenon</i> sp.	0.02		
	伪鱼腥藻属未定种 <i>Pseudoanabaena</i> sp.		0.02	
硅藻门	螺旋颗粒直链藻 <i>Melosira granulate</i> var. <i>angustissima</i>	0.02		0.10
	小环藻属未定种 <i>Cyclotella</i> sp.	0.02		0.06
绿藻门	辐球藻 <i>Radiococcus nimbatus</i>	0.05	0.05	0.04
	四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i>	0.04	0.04	
	双对栅藻 <i>Scenedesmus bijuga</i>	0.03	0.02	0.04
	四星藻属未定种 <i>Tetrastrum</i> sp.	0.02	0.02	0.02

2.3 涪湖控藻网围内、外以及工程示范区浮游植物现存量对比

如图 2 所示,涪湖控藻网围外区域内生物密度年均值($4\,359.23 \pm 2\,574.36$) $\times 10^4$ cell/L 为 3 个区域最高;网围内生物密度次之,年均值为 ($3\,201.07 \pm 2\,236.63$) $\times 10^4$ cell/L;工程示范区生物密度年均值最低,为 (454.89 ± 313.48) $\times 10^4$ cell/L。方差分析得出 3 个区域生物密度存在极显著差异 ($F = 33.698, P < 0.01$)。用 LSD 多重比较分析涪湖 3 个不同区域浮游植物生物密度得出,控藻网围内与网围外存在显著差异 ($P = 0.02$),控藻网围内、外与工程示范区皆存在极显著差异 ($P = 0.00 < 0.01; P = 0.00 < 0.01$)。控藻网围内浮游植物总生物密度中蓝藻门占 64.98%,绿藻门占 27.60%,硅藻门占 7.18%,裸藻门占 0.12%,黄藻门占 0.08%,金藻门占 0.02%,甲藻门占 0.01%。控藻网围外浮游植物总生物密度中蓝藻门占 68.13%,绿藻门占 25.99%,硅藻门占 5.53%,裸藻门占 0.11%,黄藻门占 0.21%,金藻门占 0.01%,甲藻门占 0.01%。工程示范区浮游植物总生物密度中绿藻门占 39.05%、硅藻门占 32.61%,蓝藻门占 27.65%,裸藻门占 0.17%,金藻门占 0.14%,甲藻门占 0.04%。在涪湖这 3 个区域中占总数 90% 以上的都是蓝藻、绿藻和硅藻,其中控藻网围内、外蓝藻门占的百分比最多,百分比数分别达到 64.98%、68.13%,工程示范区中蓝藻门只占 27.65% (图 3)。优势种不定微囊藻在控藻网围内、外占总生物密度的 21.62%、21.17%,而工程示范区仅占 4.07%。

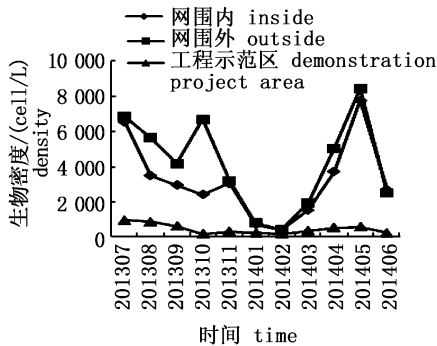


图 2 涪湖 3 个区域浮游植物生物密度的周年变化

Fig. 2 Annual variation of density of phytoplankton in 3 regions of Gehu Lake

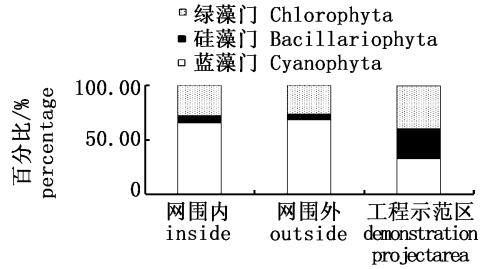


图 3 涪湖 3 个区域中主要门类浮游植物所占的百分比

Fig. 3 The percentage of different phylum phytoplankton in 3 regions of Gehu Lake

由图 4 可知,浮游植物生物量在控藻网围内的年均值为 (6.0041 ± 7.2080) mg/L;网围外年均值为 (7.6721 ± 7.7090) mg/L;工程示范区年均值为 (1.3979 ± 1.3503) mg/L。也即网围外生物量年均值最高,网围内次之,工程示范区最低,与生物密度的变化相一致。同样用方差分析得出 3 个区域生物量年均值存在极显著差异 ($F = 9.158, P < 0.01$)。多重比较的 LSD 结果表明,网围内与工程示范区以及网围外与工程示范区生物量年均值存在极显著差异 ($P = 0.00 < 0.01; P = 0.00 < 0.01$),而网围内与网围外则无显著差异。

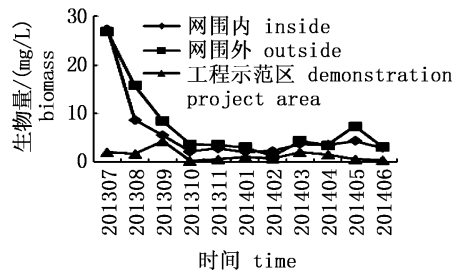


图 4 涪湖 3 个区域浮游植物生物量的周年变化

Fig. 4 Annual variation of biomass of phytoplankton in 3 regions of Gehu Lake

2.4 控藻网围内、外以及工程示范区浮游植物物种多样性的对比

控藻网围内浮游植物的 Shannon-Wiener 物种多样性指数 (H') 年均值为 2.41 ± 0.41 ;网围外为 2.46 ± 0.40 ;工程示范区为 2.22 ± 0.49 。3 个区域间无显著差异。Pielou 物种均匀度指数 (J) 网围内年均值为 0.66 ± 0.10 ;网围外为 0.66 ± 0.11 ;工程示范区为 0.71 ± 0.13 。3 个区

域间也无显著差异。Margalef 物种丰富度指数 (D) 网围内年均值为 2.26 ± 0.39 ; 网围外为 2.40 ± 0.48 ; 工程示范区为 1.46 ± 0.40 。3 个区域之间有极显著差异 ($F = 45.724, P < 0.01$)。

表 3 溇湖 3 个区域多样性指数月均值

Tab. 3 Month average of diversity indexes of phytoplankton in 3 regions of Lake Gehu

时间 time		网围内 inside	网围外 outside	工程示范区 demonstration project area
201307	<i>H'</i>	2.73 ± 0.03	2.94 ± 0.11	2.34 ± 0.58
	<i>J</i>	0.69 ± 0.02	0.72 ± 0.03	0.66 ± 0.12
	<i>D</i>	2.89 ± 0.17	3.52 ± 0.43	2.11 ± 0.57
201308	<i>H'</i>	2.55 ± 0.29	2.41 ± 0.29	2.08 ± 0.10
	<i>J</i>	0.66 ± 0.07	0.61 ± 0.07	0.64 ± 0.05
	<i>D</i>	2.73 ± 0.19	2.91 ± 0.20	1.57 ± 0.08
201309	<i>H'</i>	2.10 ± 0.06	2.09 ± 0.29	1.17 ± 0.32
	<i>J</i>	0.56 ± 0.02	0.56 ± 0.06	0.42 ± 0.08
	<i>D</i>	2.16 ± 0.45	2.11 ± 0.05	1.52 ± 0.08
201310	<i>H'</i>	2.22 ± 0.03	1.95 ± 0.35	2.62 ± 0.14
	<i>J</i>	0.63 ± 0.01	0.53 ± 0.09	0.84 ± 0.04
	<i>D</i>	2.16 ± 0.45	2.11 ± 0.05	1.52 ± 0.0
201311	<i>H'</i>	2.38 ± 0.23	2.37 ± 0.09	2.24 ± 0.07
	<i>J</i>	0.64 ± 0.06	0.63 ± 0.02	0.73 ± 0.02
	<i>D</i>	2.26 ± 0.06	2.37 ± 0.09	1.39 ± 0.23
201401	<i>H'</i>	1.70 ± 0.18	1.98 ± 0.01	1.88 ± 0.07
	<i>J</i>	0.53 ± 0.05	0.58 ± 0.00	0.67 ± 0.17
	<i>D</i>	1.55 ± 0.13	1.83 ± 0.00	1.07 ± 0.51
201402	<i>H'</i>	2.81 ± 0.02	2.82 ± 0.09	2.96 ± 0.05
	<i>J</i>	0.82 ± 0.14	0.84 ± 0.03	0.77 ± 0.03
	<i>D</i>	2.05 ± 0.38	1.86 ± 0.14	1.12 ± 0.19
201403	<i>H'</i>	2.96 ± 0.05	2.86 ± 0.09	2.33 ± 0.33
	<i>J</i>	0.79 ± 0.00	0.79 ± 0.03	0.72 ± 0.10
	<i>D</i>	2.50 ± 0.17	2.23 ± 0.12	1.60 ± 0.14
201404	<i>H'</i>	2.71 ± 0.15	2.40 ± 0.02	2.46 ± 0.13
	<i>J</i>	0.79 ± 0.00	0.79 ± 0.03	0.72 ± 0.10
	<i>D</i>	2.18 ± 0.06	2.10 ± 0.03	1.72 ± 0.04
201405	<i>H'</i>	1.85 ± 0.20	2.04 ± 0.13	2.71 ± 0.09
	<i>J</i>	0.50 ± 0.05	0.54 ± 0.04	0.82 ± 0.05
	<i>D</i>	2.11 ± 0.11	2.38 ± 0.08	1.72 ± 0.13
201406	<i>H'</i>	2.55 ± 0.11	2.87 ± 0.07	2.45 ± 0.23
	<i>J</i>	0.70 ± 0.01	0.77 ± 0.02	0.81 ± 0.02
	<i>D</i>	2.16 ± 0.27	0.33 ± 0.03	1.34 ± 0.28

2.5 浮游植物与环境因子之间的相互关系

根据溇湖浮游植物的相对密度及相对频率选择了 20 种主要的优势种类, 这 20 种主要优势种组成以及代码见表 4。首先对 20 种主要优势种进行 DCA 分析, 在 4 个排序轴中梯度最大的值是 2.326 (小于 3), 故选择线性模型 RDA 分析比较合适。RDA 分析显示, 前两个排序轴的特征值分别为 0.355 和 0.093, 物种与环境相关性轴 1 特征值为 0.894, 轴 2 为 0.804, 这说明了两个排序轴可以较好地反映出溇湖浮游植物与各环境因子之间的相互关系。图 5 显示出绝大多数优

势种类与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、水深呈现负相关关系, 与水温、*Chl. a* 和 COD 呈现正相关关系。

3 讨论

3.1 溇湖控藻网围内、外和工程示范区的浮游植物群落结构特征比较

溇湖三区域优势种比较显示网围内外优势种种类及优势度差别不大, 但这两个区域与工程示范区存在差别, 网围内外优势种排前三的是蓝藻门不定微囊藻、细小平裂藻、点状平裂藻, 而工程示范区则为螺旋颗粒直链藻、小环藻属未定种、

表 4 漏湖 3 个区域出现的主要优势种及 RDA 分析中的物种代码

Tab. 4 The main dominant species in 3 regions of Gehu Lake and the codes of species in RDA

代码 code	种类 species
1	束丝藻属未定种 <i>Aphanizomenon</i> sp.
2	伪鱼腥藻属未定种 <i>Pseudoanabaena</i> sp.
3	不定微囊藻 <i>Microcystis incerta</i>
4	微囊藻属未定种 <i>Microcystis</i> sp.
5	细小平裂藻 <i>Merismopedia minima</i>
6	点状平裂藻 <i>Merismopedia punctata</i>
7	微小色球藻 <i>Chroococcus minutus</i>
8	螺旋颗粒直链藻 <i>Melosira granulate</i> var. <i>angustissima</i> f. <i>spiralis</i>
9	美小针杆藻 <i>Synedra pulchella</i>
10	小环藻属未定种 <i>Cyclotella</i> sp.
11	辐球藻 <i>Radiococcus nimbatus</i>
12	四角十字藻 <i>Crucigenia quadrata</i>
13	四足十字藻 <i>Crucigenia tetrapedia</i>
14	狭形纤维藻 <i>Ankistrodesmus angustus</i>
15	卵囊藻属未定种 <i>Oocystis</i> sp.
16	四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i>
17	双对栅藻 <i>Scenedesmus bijuga</i>
18	双尾栅藻 <i>Scenedesmus bicaudatus</i> Chodat var. <i>bicaudatus</i>
19	居间栅藻原变种 <i>Scenedesmus intermedius</i> var. <i>bicaudatus</i>
20	四星藻属未定种 <i>Tetrastrum</i> sp.

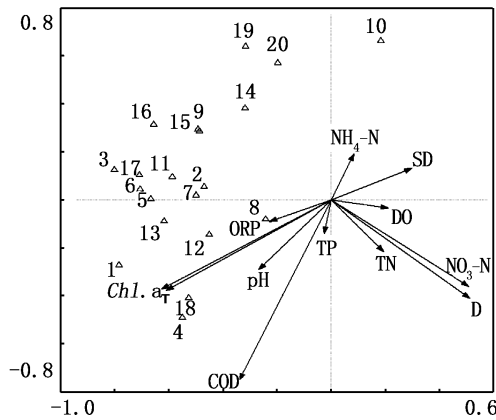


图 5 漏湖浮游植物物种与环境因子的 RDA 排序图
Fig. 5 RDA ordination diagram between phytoplankton species and environmental factors in Gehu Lake

辐球藻。也即网围内、外区域与工程示范区相比蓝藻占优势现象明显。3 个区域浮游植物生物密度生物量的对比中显示工程示范区浮游植物的生物密度与生物量都远远低于网围内外两个

区域。控藻网围区浮游植物生物密度年均值约为工程示范区的 9 倍,而生物量约为工程示范区的 5 倍,这是因为网围内、外与工程示范区相比生物密度较高的种类多为微型的蓝藻。2004 到 2006 年陈立婧等对漏湖浮游植物调查的结果显示北区生物密度 $(6\ 012.87 \pm 4\ 758.09) \times 10^4$ cell /L 高于南区 $(2\ 864.71 \pm 1\ 923.17) \times 10^4$ cell /L,生物量也是北区 (8.758 ± 3.971) mg /L 高于南区 (5.391 ± 2.102) mg/L^[4],这与本次调查的结果有很大差别,可能是漏湖北区的清淤工程对于浮游植物的群落结构产生了影响。有研究也指出,清淤对于控制蓝藻爆发在理论上有很大的可能性^[18-19],因清淤会移除底泥中大量的氮和磷,增加湖泊的深度进而降低水温,而高营养盐及高水温都是导致蓝藻爆发的重要因素。但是关于清淤对于浮游植物群落结构的影响需要更长时间监测以及更细致全面的分析。

控藻网围内与网围外浮游植物的生物密度有显著差异 ($P < 0.05$),网围外高于网围内,这可能是网围内放养了鲢鳙鱼的关系,鲢喜食蓝藻^[20],虽然其食性会随着环境及季节发生变化,但是生活在肥水中的鲢主要食蓝绿藻,因此网围内蓝绿藻的数量会比网围外要少。从东湖围隔实验的结果^[21]来看,放养鲢鳙鱼确实对控制蓝藻水华有作用。生物量的年均值虽然也是网围外大于网围内,但是差异不显著,原因可能是网围外比网围内增多的是小型蓝藻的数量,故在生物量的上差异不大。

根据国内相关湖泊富营养化评价标准^[22-23],漏湖控藻网围内外的生物密度年均值均大于 $1\ 000 \times 10^4$ cell/L,生物量年均值位于 5 ~ 10 mg/L,处于富营养化状态,工程示范区介于 $50 \sim 500 \times 10^4$ cell /L,生物量年均值介于 1 ~ 2 mg/L,处于中营养阶段。

3.2 漏湖浮游植物与环境因子的相互关系

浮游植物群落结构与水体中各环境因子有着密切的关系。不同水体中,影响浮游植物的主要环境因素也是不同的。RDA 可以较好地体现浮游植物与环境因子的相互关系,其结果显示漏湖浮游植物与水温的相关性高,为主要的影响因素,绝大多数的种类与水温表现出正相关的关系,这与国内外一些学者的研究中提出的水温是影响浮游植物生长的最直接因素这一结论相一

致^[24-26]。尤其蓝藻门的优势种类基本都与水温呈正相关关系,只有水温较低的冬季蓝藻才得到抑制。本实验中两变量相关分析 Pearson 结果表明,水温(T)与浮游植物生物密度及生物量存在极显著的正相关关系($r = 0.779, P < 0.01$; $r = 0.736, P < 0.01$),与 RDA 排序分析呈现的水温与主要优势种呈显著正相关关系的结果相一致。浮游植物主要优势种也与 COD_{Mn} 表现出较强的相关性, COD_{Mn} 是反映水体有机污染状况的一个重要指标,其值越高表示水质状况越差,这与 RDA 中显示的主要污染指示种类大多都与 COD_{Mn} 呈现较好的正相关关系一致,本次实验理化数据显示 COD_{Mn} 年均值控藻网围内外是大于工程示范区的,污染指示种类也多集中在控藻网围内外,工程示范区基本没有发现污染指示种类占优势的情况,这一结果也与 RDA 显示结果相符合。*Chl. a* 是浮游植物的一个重要组成部分,其在水体中的含量与浮游植物的密度关系密切,可在一定程度上反映出浮游植物的丰度变化,这与 RDA 排序分析得出的绝大多数浮游植物种类与 *Chl. a* 表现出正相关关系的结果相一致,本次实验中控藻网围内外浮游植物的生物密度和生物量都远远大于工程示范区,而 *Chl. a* 的年均值也是控藻网围内外高出工程示范区很多,这也与 RDA 显示结果相符合。

参考文献:

- [1] 赵为民,李端璐. 江苏南部溇湖成因演化的初步认识[J]. 江苏地质, 2006, 30(2): 106-111.
ZHAO W M, LI D H. Cognition on genesis evolution of south Gehu Lake in Jiangsu[J]. Jiangsu Geology, 2006, 30(2): 106-111.
- [2] 江苏省溇湖渔业管理委员会. 溇湖“十一五”渔业养殖规划[R]. 南京: 江苏省溇湖渔业管理委员会, 2005.
Fishery Management Council of Jiangsu Gehu Lake. “11th five-year plan” aquaculture planning of Gehu Lake [R]. Nanjing: Fishery Management Council of Jiangsu Gehu Lake, 2005.
- [3] 金明德,赵忠和,李永达. 突出生态历史保护 科学开发溇湖[J]. 常州工学院学报(社会科学版), 2006, 24(1): 8-10.
JIN M D, ZHAO Z H, LI Y D. Highlight the history ecological protection and scientific development of Gehu Lake [J]. Journal of Changzhou Institute of Technology (Social Science Edition), 2006, 24(1): 8-10.
- [4] 陈立婧,彭自然,孔优佳,等. 江苏溇湖浮游藻类群落结构特征[J]. 生态学杂志, 2008, 27(9): 1549-1556.
CHEN L J, PENG Z R, KONG Y J, et al. Characteristics of community structure of planktonic algae in Gehu Lake of Jiangsu Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(9): 1549-1556.
- [5] 陈立婧,顾静,彭自然,等. 溇湖轮虫群落结构与水质生态学评价[J]. 动物学杂志, 2008, 43(3): 7-16.
CHEN L J, GU J, PENG Z R, et al. The community structure of rotifer and ecological assessment of water quality of Lake Gehu [J]. Chinese Journal of Zoology, 2008, 43(3): 7-16.
- [6] 陈立婧,梅榛,孔优佳,等. 溇湖控藻网围中鲢鳙对枝角类群落结构的影响[J]. 水产学报, 2013, 37(4): 545-555.
CHEN L J, MEI Z, KONG Y J, et al. The influences of silver carp and bighead carp in bio-manipulation pen on the community structure of cladocera in Lake Gehu [J]. Journal of Fisheries of China, 2013, 37(4): 545-555.
- [7] 刘其根,孔优佳,陈立婧,等. 网围养殖对溇湖底栖动物群落组成及物种多样性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2005, 11(5): 566-570.
LIU Q G, KONG Y J, CHEN L Q, et al. Effect of pen aquaculture on community structure and species diversity of zoobenthos in Gehu Lake [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2005, 11(5): 566-570.
- [8] COMÍN F A, MENÉNDEZ M, LUCENA J R. Proposals for macrophyte restoration in eutrophic coastal lagoons [J]. Hydrobiologia, 1990, 200-201(1): 427-436.
- [9] 刘东艳,孙军,张利永. 胶州湾浮游植物水华期群落结构特征[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1963-1966.
LIU D Y, SUN J, ZHANG L Y. Structural characteristics of phytoplankton community during harmful algae bloom in Jiaozhou Bay [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(11): 1963-1966.
- [10] 黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 2000: 72-79.
HUANG X F. Survey, Observation and Analysis of Lake Ecology [M]. Beijing: Standards Press of China, 2000: 72-79.
- [11] 胡鸿钧,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.
HU H J, WEI Y X. The Freshwater Algae of China: Systematics, Taxonomy and Ecology [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [12] 毕列爵,胡征宇. 中国淡水藻志,第八卷,绿球藻目(上)[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
BI L J, HU Z Y. Flora Algarum Sinicarum Aquae Dulcis, Tomus VIII, Chlorococcales (I) [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [13] 陈立婧,吴竹臣,胡忠军,等. 上海崇明岛明珠湖浮游植物群落结构[J]. 应用生态学报, 2011, 22(6): 1599-1605.

- CHEN L J, WU Z C, HU Z J, et al. Phytoplankton community structure in Mingzhu Lake of Chongming Island, Shanghai[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(6): 1599 - 1605.
- [14] 邱小琮, 赵红雪, 孙晓雪. 宁夏沙湖浮游植物与水环境因子关系的研究[J]. 环境科学, 2012, 33(7): 2265 - 2271.
- QIU X Z, ZHAO H X, SUN X X. Studies on relationship of phytoplankton and water environmental factors in Shahu Lake [J]. Environmental Science, 2012, 33(7): 2265 - 2271.
- [15] 孟顺龙, 陈家长, 胡庚东, 等. 2008 年太湖梅梁湾浮游植物群落周年变化[J]. 湖泊科学, 2010, 22(4): 577 - 584.
- MENG S L, CHEN J Z, HU G D, et al. Annual dynamics of phytoplankton community in Meiliang Bay, Lake Taihu, 2008 [J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(4): 577 - 584.
- [16] 吴世军. SPSS 在数据分析中的应用[J]. 统计与决策, 2006(5): 160.
- WU S J. Application of SPSS in data analysis[J]. Statistics and Decision, 2006(5): 160.
- [17] LEPŠ J, ŠMILAUER P. Multivariate Analysis of Ecological Data Using CANOCO [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [18] 叶上扬, 喻国良, 庞红犁. 太湖蓝藻成因分析与清淤方法探讨[J]. 水资源保护, 2012, 28(2): 30 - 33, 41.
- YE S Y, YU G L, FANG H L. Analysis of formation of blue-green algae and dredging methods in Taihu Lake[J]. Water Resources Protection, 2012, 28(2): 30 - 33, 41.
- [19] JONES K. The effects of temperature on acetylene reduction by mats of blue-green algae in sub-tropical grassland [J]. The New Phytologist, 1977, 78(2): 433 - 436.
- [20] PANOVA D A, SOROKIN Y I. Experimental research in the feeding of the young bighead and silver carp [J]. Voprosy Ikhtologii, 1969, 9: 138 - 152.
- [21] 黄玉瑶. 内陆水域污染生态学 - 原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- HUANG Y Y. Pollution ecology of inland waters-principle and application[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [22] 王朝晖, 韩博平, 胡韧, 等. 广东省典型水库浮游植物群落特征与富营养化研究[J]. 生态学杂志, 2005, 24(4): 402 - 405.
- WANG Z H, HAN B P, HU R, et al. Phytoplankton community structure and eutrophication of reservoirs in Guangdong Province, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(4): 402 - 405.
- [23] 刘建康, 谢平. 用鲢鳙直接控制微囊藻水华的围隔试验和湖泊实践[J]. 生态科学, 2003, 22(3): 193 - 196.
- LIU J K, XIE P. Direct control of microcystis bloom through the use of Planktivorous carp-closure experiments and lake fishery practice [J]. Ecological Science, 2003, 22(3): 193 - 196.
- [24] REYNOLDS C S. The ecology of freshwater phytoplankton [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.
- [25] 吕培顶, 费尊乐, 毛兴华, 等. 渤海水域叶绿素 a 的分布及初级生产力的估算[J]. 海洋学报, 1984, 6(1): 90 - 98.
- LV P D, FEI Z L, MAO X H, et al. The distribution of chlorophyll a and estimation of primary productivity in Bohai Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1984, 6(1): 90 - 98.
- [26] LEHMAN P W. The influence of climate on phytoplankton community biomass in San Francisco bay estuary [J]. Limnology and Oceanography, 2000, 45(3): 580 - 590.

A comparative study of annual dynamics of community structure of phytoplankton between inside and outside of bio-manipulation pen and demonstration project area in Gehu Lake

ZHANG Yonghong¹, LIU Qigen¹, KONG Youjia², CHEN Lijing¹

(1. Key Laboratory of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources (MOE-affiliated), Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Fisheries Management Commission of Lake Gehu, Changzhou 213161, Jiangsu, China)

Abstract: Phytoplankton community structure in three regions of Gehu Lake was investigated and analyzed from July in 2013 to June in 2014. The three regions include inside and outside of bio-manipulation pen and demonstration project area. A total of 158 phytoplankton species, belonging to 7 phyla and 80 genera, were identified. There were 11 dominant species of phytoplankton in inside of bio-manipulation pen, 9 dominant species of phytoplankton in outside of bio-manipulation pen and 5 dominant species of phytoplankton in demonstration project area. The main dominant species inside and outside of bio-manipulation pen throughout the year was: *Microcystis incerta*, and in demonstration project area was *Melosira granulate var. angustissima*. The order of standing crop is: outside of bio-manipulation pen > inside of bio-manipulation pen > demonstration project area. LSD from multiple comparison showed that density of phytoplankton had significant difference between inside and outside of bio-manipulation pen ($P < 0.05$). Extremely significant difference was found between inside of bio-manipulation pen and demonstration project area ($P < 0.01$), between outside of bio-manipulation pen and demonstration project area ($P < 0.01$). Biomass of phytoplankton had extremely significant differences between inside of bio-manipulation pen and demonstration project area ($P < 0.01$), between outside of bio-manipulation pen and demonstration project area ($P < 0.01$). There was no significant difference between inside and outside of bio-manipulation pen. RDA and Pearson showed that water temperature (WT), *Chl. a* and COD_{Mn} were the main environmental variables affecting the community structure of phytoplankton.

Key words: Gehu Lake; bio-manipulation pen; demonstration project area; phytoplankton; community structure