

文章编号:1004-8227(2010)09-0997-06

淀山湖浮游植物叶绿素 a 粒径组成及其与水质因子相关性

王丽卿, 许 莉, 季高华, 张瑞雷, 范志锋

(上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306)

摘 要: 于 2005 年 6 月至 2006 年 5 月对淀山湖小型($20\sim 200\ \mu\text{m}$)、微型($2\sim 20\ \mu\text{m}$)和微微型($<2\ \mu\text{m}$)浮游植物叶绿素 a 和水质因子进行逐月调查研究。结果表明:小型和微型浮游植物是淀山湖水体年均叶绿素 a 的主要贡献者,二者贡献率之和为 74.79%。淀山湖叶绿素 a 粒径组成百分比的季节变动与水体浮游植物群落结构季节演替密切相关:小型浮游植物叶绿素 a 浓度所占百分比春季最高,而微型、微微型的则分别在秋、冬季最高。相关性分析显示,小型、微型浮游植物叶绿素 a 浓度百分比与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量分别呈显著正、负相关,微微型浮游植物叶绿素 a 百分比与 BOD_5 呈极显著负相关。对应滤食性鱼类等水生动物的食性粒级,探讨了运用非经典生物操纵技术防治淀山湖富营养化的可行性。

关键词: 浮游植物; 叶绿素 a 粒径组成; 水质因子; 淀山湖

文献标识码: A

不同粒径浮游植物在湖泊生态系统食物链中有着各自重要的地位,浮游植物粒级结构的调查研究对理解湖泊的物质循环和能量流动具有重要意义^[1,2]。目前关于海洋生态系统中浮游植物粒径组成和不同粒径浮游植物对总初级生产力的贡献等方面有不少报道^[3~8],而淡水生态系统中作为生物操纵基础食物链环节的浮游植物粒级方面的研究报道相对较少,国内仅在武汉东湖和盐碱池塘有报道^[9~11]。淀山湖作为典型的长江中下游浅水湖泊,其营养盐浓度已达到爆发蓝藻水华的阈值,只要夏天水文、气象等条件适宜,就会大量爆发水华^[12]。当前湖泊富营养化治理的实践表明,无论外源营养负荷的削减,还是物理化学除藻措施的施行,均不能在大尺度水域取得良好而持久的控藻效果^[13,14]。基于水生动物的“下行效应”,Shapiro、刘建康等分别提出了经典生物操纵理论和非经典生物操纵理论,强调从营养环节摄食浮游藻类以控制水华爆发^[15,16]。因此,研究如何综合运用摄食不同粒径浮游植物的水生动物进行综合控藻,对完善特定水域的生物操纵理论具有一定的指导价值。本文于 2005 年 6 月至 2006 年 5 月测定了

淀山湖水体小型浮游植物(Micro-phytoplankton, $20\sim 200\ \mu\text{m}$, 亦记 Micro-)、微型浮游植物(Nano-phytoplankton, $2\sim 20\ \mu\text{m}$, 亦记 Nano-)和微微型浮游植物(Pico-phytoplankton, $<2\ \mu\text{m}$, 亦记 Pico-)的叶绿素 a 浓度,分析了各粒级浮游植物对总叶绿素 a 的贡献,为滤食性水生动物在淀山湖富营养化防治中的应用提供理论指导。

1 研究地区与研究方法

1.1 采样点设置和采样时间

淀山湖地处江苏、浙江、上海两省一市交界处,为太湖流域一个吞吐性浅水湖泊,水域面积 $62.5\ \text{km}^2$,平均水深 $2.1\ \text{m}$,最大水深 $3.6\ \text{m}$ 。依据淀山湖形态、水文以及湖内渔业状况,设 6 个采样点(图 1),分别为:St1 淀峰(出水口);St2 金家庄附近;St3 千墩湾;St4 湖心;St5 急水港(进水口);St6 马兰港(湖南区)。水样采集从 2005 年 6 月至 2006 年 5 月逐月进行,用 5 L 有机玻璃桶状采水器采集每个站点离表层 $0.5\ \text{m}$ 、 $1.5\ \text{m}$ 的水样混合后作为测定水样。

收稿日期:2010-02-06;修回日期:2010-04-07

基金项目:上海市科学技术委员会重大项目(08DZ1203103);上海市重点学科建设项目(S30701)

作者简介:王丽卿(1970~),女,浙江省东阳人,教授,主要从事水生生物生态学和生物修复研究。E-mail:lwqiang@shfu.edu.cn

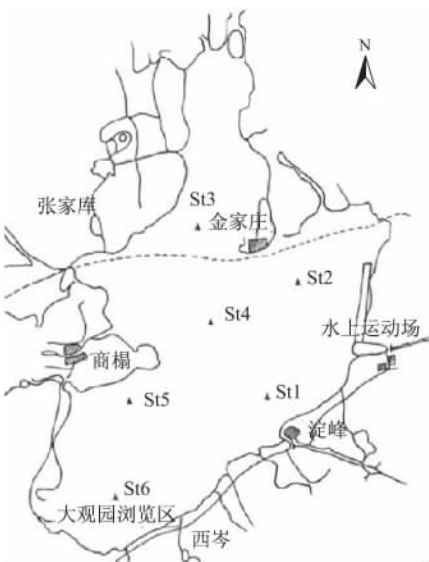


图 1 淀山湖采样点分布

Fig. 1 Locations of Sampling Sites in Dianshan Lake

1.2 叶绿素分级方法

取 2~3 L 经 200 μm 筛绢预过滤的水样, 分别用 20 μm 筛绢、2 μm 混合纤维滤膜和 0.45 μm 醋酸纤维滤膜连续过滤^[11], 获得 >20 μm、>2 μm 和 >0.45 μm 粒级的叶绿素 a 浓度。小型浮游植物 (20~200 μm) 叶绿素 a 浓度即 20 μm 滤膜过滤的叶绿素浓度; 微型浮游植物 (2~20 μm) 叶绿素 a 浓度即 2 μm 滤膜过滤的叶绿素 a 浓度减去 20 μm 滤

膜过滤的叶绿素 a 浓度; 微微型 (<2 μm) 浮游植物叶绿素 a 浓度即为 0.45 μm 滤膜过滤的叶绿素 a 浓度减去 2 μm 滤膜过滤的叶绿素 a 浓度。滤膜样本于低温条件下经 90% 丙酮萃取 24 h 后, 经离心后用 UV-2100 紫外分光光度计于 750、630、645 和 663 nm 波段处进行测量。

1.3 水质指标及测定方法

在测定浮游植物叶绿素 a 的同时, 进行水温 (T)、pH 值、透明度 (SD)、溶解氧 (DO)、五日生化需氧量 (BOD₅)、高锰酸盐指数 (COD_{Mn})、氨氮 (NH₃-N)、亚硝酸盐 (NO₂-N)、硝酸盐 (NO₃-N)、磷酸盐 (PO₄³⁻-P) 和总磷 (TP) 等水质指标的测定。测定方法具体参照《水和废水监测分析方法》^[17]。

各粒级浮游植物叶绿素 a 与水质因子的相关性分析应用 SPSS 16.0 软件完成。

2 结果与分析

2.1 淀山湖水质状况

淀山湖 2005~2006 年调查期间主要水质因子的平均值和变幅如表 1 所示。淀山湖年均水温 18.07℃, 水体 NH₃-N 含量较高, 年均为 2.30 mg/L, 为国家地表水环境质量标准 GB3838-2002 劣 V 类水; 其他水质指标均值均处 IV 类及以上水质等级。

表 1 调查期间淀山湖水质因子数据 (mg/L)

Tab. 1 Average of Water Quality Variables in Dianshan Lake During Survey Period

参数	T (℃)	SD (cm)	pH	DO	COD _{Mn}	BOD ₅	NH ₃ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	PO ₄ ³⁻ -P	TP
平均值	18.07	41.07	8.01	8.43	5.07	4.90	2.30	0.11	0.26	0.12	0.26
最大值	29.75	68.33	8.68	11.53	6.72	10.47	4.70	0.25	0.58	0.21	0.48
最小值	4.60	23.00	7.72	5.00	2.85	1.66	0.38	0.01	0.10	0.05	0.12

2.2 淀山湖分粒级叶绿素 a 组成及动态

在 2005 年 6 月至 2006 年 5 月周年调查中, 淀山湖小型、微型和微微型叶绿素 a 浓度的年均值 (表 2) 分别为 10.38±5.47、10.18±5.02 和 6.16±2.53 mg/m³, 月均值变幅分别为 2.84~26.32、3.4~31.3 和 0.74~13.31 mg/m³。小型、微型和微微型叶绿素 a 浓度占总量的百分比如图 2 所示, 均值分别为 37.17%、37.62% 和 25.21%, 变幅分别为 19.25%~56.51%、10.48%~58.92% 和 3.45%~41.18%。从季节变动上, 小型浮游植物叶绿素 a 百分比浓度在春季较高, 微型浮游植物叶绿素 a 百分比在秋季较高, 而微微型浮游植物叶绿素 a 百分比则在冬季较高。小型浮游植物叶绿素 a 浓度百分比

表 2 调查期间淀山湖分粒级叶绿素 a 浓度 (mg/m³)

Tab. 2 All Size-fractionated Chl-a Concentrations in Dianshan Lake During This Survey

采样时间	小型藻类	微型藻类	微微型藻类
2005-06	19.38±4.42	31.3±10.67	9.66±5.43
2005-07	6.82±2.30	5.82±1.48	7.68±2.93
2005-08	7.19±3.83	10.05±3.98	6.75±2.82
2005-09	2.84±1.28	8.69±2.71	3.22±1.37
2005-10	6.38±1.48	10.99±4.66	2.53±1.03
2005-11	10.46±4.01	8.72±3.93	6.43±3.41
2005-12	6.33±1.69	7.15±3.81	7.1±3.74
2006-01	15.72±4.54	3.4±2.70	13.31±4.02
2006-02	5.24±1.68	3.78±1.37	5.23±1.88
2006-03	9.6±4.93	4.2±1.58	9.66±5.43
2006-04	26.23±9.34	18.59±6.97	1.6±0.83
2006-05	8.35±2.36	9.54±4.93	0.74±0.43
年均值	10.38±5.47	10.18±5.02	6.16±2.53

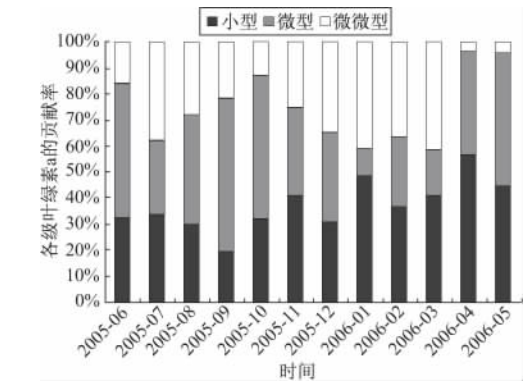


图 2 2005~2006 年淀山湖不同粒径浮游植物叶绿素 a 的贡献率

Fig. 2 Percentage of Size-fractionated Chla of Phytoplankton in Dianshan Lake During 2005~2006

在 2006 年 4 月份最高(56.51%),2005 年 9 月最低(19.23%);微型浮游植物叶绿素 a 浓度百分比在 2005 年 9 月最高(58.92%),2006 年 1 月最低(10.49%);微微型浮游植物叶绿素 a 浓度百分比在 2006 年的 1、2 和 3 月相对较高(分别为 41.05%、36.70%和 41.19%),在 2005 年 10 月最低。

2.3 各粒径浮游植物叶绿素 a 与水质因子相关性
分别对各粒径浮游植物叶绿素 a 浓度、各粒径叶绿素 a 所占百分比与水质因子进行相关性分析,结果如表 3 所示:小型浮游植物叶绿素 a 浓度与 pH

值呈极显著正相关,微型和微微型叶绿素 a 浓度与各水质因子均无显著相关性。小型浮游植物叶绿素 a 百分比与 pH 值呈极显著正相关($r=0.747$),与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 呈显著正相关($r=0.670$);微型浮游植物的百分比与水温呈显著正相关($r=0.644$),与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 呈显著负相关($r=-0.720$);微微型浮游植物的百分比则与 BOD_5 呈极显著负相关($r=-0.807$)。可见,淀山水温、pH 值、 BOD_5 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 对浮游植物粒级结构有一定的影响,各因子对各粒径浮游植物影响的程度不同。

3 讨论

3.1 淀山湖粒径分级叶绿素 a 贡献率和水体富营养化的关系

基于水质指标和叶绿素 a 的浓度,淀山湖全湖已经处于富营养化水平。本文调查结果发现,不同季节中各粒径叶绿素 a 的贡献率各不相同。从周年平均贡献率来看,淀山湖微型浮游植物对叶绿素 a 的贡献率最大(37.62%),小型浮游植物次之(37.17%),微微型浮游植物贡献最小(25.21%);前两者(2 μm 以上)之和占 74.79%,为淀山湖叶绿素 a 的主要贡献者。

表 3 不同粒径浮游植物叶绿素 a 与淀湖水水质因子的相关分析

环境因子	Micro-Chla	Nano-Chla	Pico-Chla	Micro-Chla%	Nano-Chla%	Pico-Chla%
水温(℃)	-0.069	0.424	-0.355	-0.370	0.644*	-0.446
pH 值	0.815**	0.270	-0.130	0.747**	-0.076	-0.365
COD _{Mn} (mg/L)	0.093	0.357	-0.075	-0.080	0.303	-0.278
BOD ₅ (mg/L)	0.579	0.469	-0.598	0.559	0.511	-0.807**
NH ₃ -N(mg/L)	0.339	-0.230	0.246	0.670*	-0.720*	0.341
NO ₂ -N(mg/L)	0.120	0.402	-0.334	0.068	0.421	-0.514
NO ₃ -N(mg/L)	-0.126	-0.355	0.322	0.211	-0.441	0.336
PO ₄ ³⁻ -P(mg/L)	-0.196	0.225	0.326	-0.567	0.191	0.196
TP(mg/L)	0.321	-0.012	0.503	0.243	-0.267	0.130

注:“*”表示 $P<0.05$,显著相关;“**”表示 $P<0.01$,极显著相关

Hein & Riemann 认为营养盐是影响浮游植物粒径结构的重要因素,小粒径的浮游植物适应低营养盐环境,而高营养盐环境更能满足较大粒径浮游植物的生长^[18]。Stockner & Antia 指出,微微型浮游植物通常在寡营养水域占优势,在营养物含量过剩的水域中,微微型浮游植物的生物量会降低^[19,20]。赵文等对人工淡水水体不同粒径叶绿素 a 的研究结果中,微微型浮游植物叶绿素 a 在中富营

养型的植物园水体中占 29.7%;在富营养型水体儿童公园和马栏河中则分别仅占 3.1%和 14.6%,明显低于微型浮游植物的贡献率(表 4)^[11]。淀山湖微微型浮游植物对浮游植物生物量的贡献率为 25.21%,显著低于贫营养海洋^[21]、高于富营养型小水体的调查结果。可见,淀山湖中适应寡营养水体生长的微微型浮游植物叶绿素 a 浓度百分比比较低,一定程度上表明淀山湖已属于高营养盐水体。

表 4 不同性质水域各粒级浮游植物对
总叶绿素 a 的贡献比较

Tab. 4 Comparison with Percentage of All Size-
fractionated Chla in Different Waters

水域性质	Nano Chla%	Pico Chla%	参考文献
贫营养海洋	—	70	[21]
中营养小湖泊	35.1	29.7	[11]
富营养小湖泊	67.1	3.1	[11]
富营养小河流	47.3	14.6	[11]
淀山湖(中富营养)	37.03	25.21	本文

注：“—”表示无相关数据

3.2 叶绿素 a 粒级组成与浮游植物群落演替

淀山湖叶绿素 a 粒级组成百分比的季节变动规律与淀山湖浮游植物群落结构季节演替密切相关。淀山湖浮游植物群落(生物量)主要由硅藻、蓝藻、绿藻和隐藻组成^[22],浮游植物季节演替表现为:春季以隐藻、绿藻、硅藻为主,夏季以蓝藻为主,秋季以蓝藻、硅藻为主,冬季则以硅藻、绿藻、隐藻组成为主。淀山湖小型浮游植物叶绿素 a 百分比均值在春、冬季(47.42%、38.68%)较高,这与冬季和第二年初春粒径较大的硅藻、隐藻对浮游植物的贡献较大有关;微型浮游植物叶绿素 a 百分比在夏、秋季(40.81%、49.39%)较高,这与蓝藻在夏季占绝对优势以及群体状态生活的蓝藻在秋季逐渐死亡分解为粒径较小的颗粒有关;微微型浮游植物叶绿素 a 所占百分比在冬季(37.41%)最高,则与夏秋季藻类群体逐渐散开成小粒径的颗粒等有关。

3.3 淀山湖环境因子对各粒级叶绿素 a 的影响

湖泊中浮游植物的粒级结构受到多种环境因子的影响,包括水温、营养盐及滤食动物的摄食等。不同粒径浮游植物叶绿素 a 浓度百分比与理化因子相关性分析表明,微型浮游植物的比例与水温关系密切,即在水温较高的夏季,蓝藻门等微型浮游植物(2~20 μm)对淀山湖叶绿素 a 的贡献较大^[23];在营养盐方面,各粒级浮游植物和水体营养盐中的氨氮含量关系密切,与磷元素则无显著相关性。水体中 NH₃-N 和生化需氧量(BOD₅)均为反映其污染程度和需氧有机物的含量的指标,指标越大,表明水体受有机污染越严重^[24]。淀山湖小型和微型浮游植物叶绿素 a 百分比与 NH₃-N 分别呈显著正、负相关($r=0.670$ 、 $r=-0.720$),微微型浮游植物叶绿素 a 百分比与 BOD₅ 呈极显著负相关($r=-0.807$)的结果表明,各粒级浮游植物叶绿素 a 与水体受污染程度存在密切关系,即随着水体受污染程度加重,小

粒径藻类对叶绿素 a 的贡献率会降低,大粒径藻类的贡献率相对升高;反之亦然。

3.4 基于淀山湖浮游植物粒级结构的生物操纵技术

浮游植物粒径组成的不同不仅与水体营养状况有密切关系,还受到滤食动物(滤食性枝角类、鱼类和大型底栖动物)放养密度的影响。不同粒级的浮游植物需要相对应食性粒级的水生动物来控制,这正是生物操纵理论应用于湖泊富营养化防治的关键所在。Shapiro 等提出的生物操纵理论所依赖的主角是浮游动物,其中大型蚤、秀体蚤等大型枝角类是摄食藻类的主要力量。Gliwica 提出蚤的食物一般小于 40~50 μm^[25],Hélène 等实验表明枝角类为优势的浮游动物群落可以摄食 28~78μm 大小的藻类^[26];当藻类生物量达到饱和值后,浮游动物的清滤率不再升高,甚至下降^[27]。然而淀山湖微型和微微型浮游植物(<20 μm 粒径)叶绿素 a 的贡献率为 62.83%,且淀山湖浮游枝角类优势种的数量变动与浮游植物数量变动保持一致^[22],因此增加枝角类等(摄食的粒径范围很小)浮游动物的数量来控制淀山湖蓝藻的方法不可行。此外,淀山湖小型浮游动物数量比例较高、大型浮游动物(枝角类、桡足类)数量较少的群落结构特征^[28],也减少了利用浮游动物控藻的可能。

蚌类等滤食性底栖动物在富营养化严重水体中的耐污、耐重金属能力比较强,主要滤食 50~1 000 μm 大小的微型生物和有机碎屑(以浮游植物为主)^[29],它们的移动性比鱼类弱。因此,可以适当增加底栖动物的生物量以协助控制藻类的过量繁殖。

刘建康、谢平提出的非经典生物操纵理论,已在武汉东湖、滇池和巢湖等富营养化湖泊的污染治理得到应用,鲢鳙等滤食性鱼类的放养使浮游动植物生物量锐减、蓝藻比例大幅下降,透明度升高进而改善了水质^[30,31]。作为滤食性的中上层鱼类,鲢鱼以 15~41 μm 范围的浮游植物为食,鳙鱼主要滤食 40~110 μm 的浮游动物^[32]。鲢鳙鱼主要靠鳃耙滤取食物,对食物的种类没有主动选择能力;电镜研究显示,全长 30 mm 以上的鲢的鳃耙间距为 8~20 μm,侧突间距 15~33 μm^[33]。本文研究表明,小型和微型浮游植物为淀山湖浮游植物的主要贡献者(占 74.79%)。因此,依据滤食性鱼类摄食颗粒物的粒径大小,采取非经典的生物操纵技术,有望在淀山湖蓝藻水华爆发和富营养化防治方面取得较好的效果。

4 结论

(1) 小型和微型浮游植物是淀山湖水体周年平均叶绿素a的主要贡献者,二者贡献率之和为74.79%;微微型浮游植物叶绿素a所占比例最少,表明淀山湖已属于营养盐含量较高的水体。

(2) 淀山湖叶绿素a粒径组成百分比在不同季节各有差异,其中小型浮游植物叶绿素a浓度所占百分比春季最高,而微型、微微型浮游植物叶绿素a浓度则分别为秋、冬季最高,这与淀山湖浮游植物群落结构季节演替密切相关。

(3) 各粒级浮游植物叶绿素a与环境因子的相关性分析表明,小型、微型浮游植物叶绿素a浓度百分比与营养盐中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 分别呈显著正、负相关,微微型浮游植物叶绿素a百分比与 BOD_5 呈极显著负相关,各粒级浮游植物叶绿素a与水体受污染程度相联系。

(4) 淀山湖小型和微型浮游植物叶绿素a贡献率之和为74.79%,依据滤食性鱼类摄食颗粒物的粒径大小,建议采取非经典的生物操纵技术来控制淀山湖蓝藻水华的大量繁殖。

致谢 对王旭晨,盖建军,张军毅等在采样、实验中的大力帮助顺致谢意。

参考文献:

- [1] JOHN M S, SMETACEKV, LENZ J. Pelagic ecosystem structure: Heterotrophic components of the plankton and their relationship to plankton size fractions [J]. *Limnology and Oceanography*, 1978, 23(6): 1256~1263.
- [2] 宋书群, 孙 军, 沈志良, 等. 三峡库区蓄水后夏季长江口及其邻近水域粒级叶绿素[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2006, 36(z1): 114~120.
- [3] JOCHEM F J, MATHOT S, QUÉGUINER B. Size-fractionated primary production in the open Southern Ocean in austral spring[J]. *Polar Biology*, 1995, 15(6): 381~392.
- [4] WEBER L H, EL-SAYED S Z. Contributions of the net, nano- and picoplankton to the phytoplankton standing crop and primary productivity in the Southern Ocean [J]. *Journal of Plankton Research*, 1987, 9(5): 973.
- [5] MAGAZZU G, DECEMBRINI F. Primary production, biomass and abundance of phototrophic picoplankton in the Mediterranean Sea: A review[J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 1995, 9(1): 97~104.
- [6] 黄邦钦, 刘 媛, 陈纪新, 等. 东海、黄海浮游植物生物量的粒级结构及时空分布[J]. *海洋学报*, 2006, 28(2): 156~164.

- [7] 蔡昱明, 宁修仁, 刘子琳, 等. 莱州湾浮游植物粒径分级叶绿素a和初级生产力及新生产力[J]. *海洋科学集刊*, 2002(44): 1~10.
- [8] 曹振锐, 黄邦钦, 刘 媛, 等. 厦门海域分粒级叶绿素a含量的分布特征[J]. *台湾海峡*, 2005, 24(4): 493~501.
- [9] 王 建, 林婉莲. 武汉东湖超微藻生态学的初步研究[J]. *湖泊科学*, 1998, 10(4): 71~76.
- [10] 赵 文, 戴昀娣. 氯化物水型盐碱池塘浮游植物叶绿素a的研究[J]. *湖泊科学*, 2000, 12(3): 247~254.
- [11] 赵 文, 邢 辉. 不同粒级浮游植物对淡水初级生产力的作用[J]. *大连水产学院学报*, 2001, 16(3): 157~162.
- [12] 程 曦, 李小平. 淀山湖氮磷营养物20年变化及其藻类增长响应[J]. *湖泊科学*, 2008, 20(4): 409~419.
- [13] 孙 刚, 盛连喜. 湖泊富营养化治理的生态工程[J]. *应用生态学报*, 2001, 12(4): 590~592.
- [14] 王国祥, 成小英, 濮培民. 湖泊藻型富营养化控制——技术、理论及应用[J]. *湖泊科学*, 2002, 14(3): 273~282.
- [15] SHAPIRO J. Biomanipulation: the next phase-making it stable[J]. *Hydrobiologia*, 1990, 200(1): 13~27.
- [16] 刘建康, 谢 平. 揭开武汉东湖蓝藻水华消失之谜[J]. *长江流域资源与环境*, 1999, 8(3): 312~319.
- [17] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [18] HEIN M, RIEMANN B. Nutrient limitation of phytoplankton biomass or growth rate: An experimental approach using marine enclosures[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1995, 188(2): 167~180.
- [19] STOCKNER J G, ANTIA N J. Algal picoplankton from marine and freshwater ecosystems: A multidisciplinary perspective [J]. *Canadian journal of fisheries and aquatic sciences*, 1986, 43(12): 2472~2503.
- [20] STOCKNER J G. Autotrophic picoplankton in freshwater ecosystems: The view from the summit [J]. *Internationale Revue der Gesamten Hydrobiologie*, 1991, 76(4): 483~492.
- [21] KRUPATKINA D K. Estimates of primary production in oligotrophic waters and metabolism of picoplankton: A review [J]. *MAR MICROB FOOD WEBS*, 1990, 4: 11.
- [22] 王丽卿. 淀山湖浮游生物群落结构特征及与环境因子的相关性[D]. 上海: 上海海洋大学, 2008.
- [23] 万 蕾, 朱 伟, 操家顺, 等. 苏州重污染河道水体浮游植物消长规律初探[J]. *长江流域资源与环境*, 2006, 15(2): 237~243.
- [24] 刘冬燕, 赵 敏, 林文鹏. 黑臭水体生物修复中各粒级浮游植物与环境因子的关系[J]. *水生生物学报*, 2009(3): 418~425.
- [25] GLIWICZ Z M. Filtering rates, food size selection, and feeding rates in cladocerans——Another aspect of interspecific competition in filter-feeding zooplankton [C] // *Limnol Oceanogr Spec Symp*, 1980.
- [26] CYR H, CURTIS J M. Zooplankton community size structure and taxonomic composition affects size-selective grazing in natural communities[J]. *Oecologia*, 1999, 118(3): 306~315.
- [27] 韩士群, 严少华, 范成新, 等. 长肢秀体溞对富营养化水体藻类

的生物操纵[J]. 江苏农业学报, 2006, 22(1): 81~85.

[28] 郑小燕, 王丽卿, 盖建军, 等. 淀山湖浮游动物的群落结构及动态[J]. 动物学杂志, 2009, 44(5): 78~85.

[29] 杨婷婷. 河蚌挂养与植物浮床集成技术在苏州重污染河道中净化模式的探讨[D]. 南京: 河海大学, 2007.

[30] 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): 193~198.

[31] KAJAK Z, RYBAK J, SPONDNIIEWSKA F. Influence of the planktivorous fish *Hypophthalmichthys molitrix*, on the plankton and benthos of the eutrophic lake[J]. *Pol Arch Hydrobiol*, 1999, 46: 301~310.

[32] 林 涛, 崔福义, 刘冬梅, 等. 水源治理中鱼类的摄食选择性对其生物操纵作用的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(1): 35~37.

[33] JEPPESEN E, S NDERGAARD M, MORTENSEN E, et al. Fish manipulation as a lake restoration tool in shallow, eutrophic temperate lakes 1: Cross-analysis of three Danish case-studies[J]. *Hydrobiologia*, 1990, 200(1): 205~218.

SIZE-FRACTIONATED CHLOROPHYLL-A OF
PHYTOPLANKTON AND THE CORRELATION WITH WATER
QUALITY VARIABLES IN DIANSHAN LAKE, CHINA

WANG Li-qing, XU Li, JI Gao-hua, ZHANG Rui-lei, FAN Zhi-feng
(College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Size-fractionated chlorophyll-a of phytoplankton and water quality variables were investigated monthly from June 2005 to May 2006 in Dianshan Lake. Results showed that the chlorophyll-a concentration of micro-phytoplankton (20~200 μm) and nano-phytoplankton (2~20 μm) were main contributors to the annual mean of chlorophyll-a in Dianshan Lake, both accounting for 74.79%. Seasonal variations of percentages of all size-fractionated chlorophyll-a were closely related with seasonal succession of phytoplankton community structure. Percentage of micro-phytoplankton chlorophyll-a peaked in spring, while that of nano-, pico-phytoplankton peaked in autumn and winter, respectively. Bivariate correlation analysis showed that percentage of micro-phytoplankton chlorophyll-a was correlated positively with $\text{NH}_3\text{-N}$, while that of nano-phytoplankton was correlated negatively with $\text{NH}_3\text{-N}$. Percentage of pico-phytoplankton chlorophyll-a was correlated negatively with BOD_5 , significantly. Correspondingly, the feasibility of non-classic biomanipulation in controlling algal bloom in Dianshan Lake on the basis of feeding habits of aquatic animals such as filtering fish was also discussed.

Key words: phytoplankton; size-fractionated chlorophyll-a; water quality variables; Dianshan Lake