

淀山湖浮游植物初级生产力及其影响因子

汪益嫔¹, 张维砚¹, 徐春燕¹, 胡雪芹¹, 童琰¹, 由文辉^{2*}

(1. 华东师范大学环境科学系, 上海 200062; 2. 华东师范大学环境科学系, 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200062)

摘要: 为了解淀山湖浮游植物初级生产力时空变化及与环境因子的相关关系, 于 2009 年 4 月~2010 年 3 月采用黑白瓶法对其进行逐月采样调查. 结果表明, 初级生产力(以 C 计)四季变化规律为夏季 $[0.95 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}] >$ 冬季 $[0.83 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}] >$ 春季 $[0.77 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}] >$ 秋季 $[0.62 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}]$. 水平分布上, 南北部生产力值较高, 东西部相对较低, 各样点差别不显著($p > 0.05$). 垂直分布上, 浮游植物光能可得性是制约初级生产力的一个重要因素, 初级生产力以水下 0.3 m 处较 0.5 m 处高约 12.7%, 而夏季水体表层由于光抑制作用初级生产力较低. 初级生产力四季变化可能跟浮游植物群落结构和优势种更替有较大关系, 与叶绿素 a、浮游植物密度均呈极显著正相关($p < 0.01$), 前者相关性更好. 浮游植物的生物量(或现存量)与其生产量之间存在正相关, 生产量可为浮游植物数量变化提供一定的参考.

关键词: 淀山湖; 浮游植物; 初级生产力; 时空分布; 相关分析

中图分类号: X173 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)05-1249-08

Phytoplankton Productivity and Its Influencing Factors in Dianshan Lake

WANG Yi-pin¹, ZHANG Wei-yan¹, XU Chun-yan¹, HU Xue-qin¹, TONG Yan¹, YOU Wen-hui²

(1. College of Resources and Environment Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Urbanization and Ecological Restoration, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: To understand the relationship between the spatial-temporal variations of phytoplankton primary productivity and its environmental factors in Dianshan Lake, monthly survey was carried out from April, 2009 to March, 2010, with the method of white and black bottles. The result shows that seasonal variation of primary productivity (calculated according to carbon, following the same) is summer $[0.95 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}] >$ winter $[0.83 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}] >$ spring $[0.77 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}] >$ autumn $[0.62 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}]$. From the flat distribution, primary productivity is higher in northern and southern parts than that in east and west, with no significant differences in each point ($p > 0.05$). From the vertical distribution, phytoplankton light availability is an important limiting factor. Primary production of 0.3 m underwater is higher than that of 0.5 m. However, primary production of 0.3 m level in summer is lower because of light inhibition. Seasonal changes in primary productivity may be due to phytoplankton community structure and replacement of the dominant species. There are significantly positive correlation between Chlorophyll a (Chl-a) and phytoplankton density with primary productivity ($p < 0.01$), and Chl-a has better correlation with primary productivity. Phytoplankton biomass shows a positive reaction to its productivity and may preliminary provide a reference for the number of phytoplankton.

Key words: Dianshan Lake; phytoplankton; primary productivity; spatial and temporal distribution; correlation analysis

湖泊初级生产量由浮游植物、着生藻类、水生维管束植物和自养细菌构成, 但浮游植物是主要原初生产者^[1], 特别是在深水水域, 水草和底生藻类微不足道, 浮游植物几乎是唯一的生产者^[2], 是其生态系统食物网的结构与功能的基础环节. 国内外关于水体初级生产力相关报道可追溯至 20 世纪 60、70 年代, William 等^[3] 和 Schindler^[4] 分别研究了热带湖泊以及世界不同淡水水体初级生产力, Goulder^[5] 侧重研究了相互作用的淡水水生植物和浮游藻类初级生产效率的关系. 随着研究方法和科技手段的进步, 目前还涉及水下光捕获率如何影响初级生产力^[6], 通过氧同位素技术测定浮游植物初级光和作用速率与呼吸速率^[7] 以及集水区和鱼类的营养循环如何影响水体初级生产力等^[8]. 国内侧

重于水体浮游植物生物量、叶绿素与初级生产力的时空分布研究^[9], 并结合遥感技术^[10] 以及特定藻类初级生产力的单因子限制探究^[11] 等. 浮游植物生产力研究可用于估算渔产潜力^[12]、评价水体营养类型, 同时也对湖泊生态系统和湖泊环境特征具有较强的指示作用^[13,14].

湖泊初级生产过程十分复杂, 受光照、温度、营养盐、浮游植物生物量等环境因子影响^[15], 以往黑白瓶法大多采用浮标和沉子控制不同水层挂瓶深度^[16]. 本实验以淀山湖大型开放性水体为研究对

收稿日期: 2010-05-19; 修订日期: 2010-07-28

基金项目: 上海市科委科技项目(08DZ1203102, 08DZ1203002)

作者简介: 汪益嫔(1985~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水域生态学, E-mail: wangyipin_1008@163.com

* 通讯联系人, E-mail: youwenhui1964@126.com

象,将经典黑白瓶法进行改进,利用 PVC 管固定,既克服挂瓶的不稳定性,也保证采样时间的准确性.本研究于 2009 年 4 月~2010 年 3 月对淀山湖初级生产力进行了测定,旨在通过该项调查,参照历史资料^[17],对该湖初级生产力状况进行分析,为该水域的水质和生物资源进行合理开发利用及生物治理提供科学依据.

1 材料与方 法

1.1 淀山湖概况和采样点设置

淀山湖位于苏、浙、沪两省一市交界处,地理位置为北纬 31°04′~30°02′、东经 120°54′~121°01′,是上海市郊最大的湖泊.流域面积 445.9 km²,属亚热带季风气候,四季分明,日光充足,年日照时数 2 071.1 h;气候温和,年均气温 15.5℃;雨量充沛,年均降水量 1 037.7 mm;全年无霜期达 235 d.湖泊容积 1.3 × 10⁷ m³,平均水温 17.7℃,换水周期约为 29 d^[18].主体湖区位于上海市青浦区境内,北部属于江苏省昆山市.沿岸带(500 m)中,乡村聚落是人类活动集中、对淀山湖干扰最大的用地类型,其他主要以农地、林地、鱼塘和少量的湿地为主.公园绿地对淀山湖沿岸带不构成负面影响,主要包括大观园和东方绿洲,而农地、鱼塘则是主要面源污染的来源^[19].本研究选择的样点主要包括了湖区的入水口、出水口、近岸水域和原网箱养殖渔场等类型.

淀山湖水面较大,承担着水上航运功能,作为黄浦江上游的重要水源保护地,其水质、水量状况对上海市饮用水水源安全具有重要作用.近年来,淀山湖水体质量不断下降,综合水质标准由过去的 II 类为主下降为目前的 IV~V 类,部分区域水质劣于地表水 V 类水质标准,达不到水源保护地的水质要求,在 1999~2000 年之间,淀山湖由中度富营养化湖泊逐渐转化为重度富营养化湖泊^[20].2007 年鱼类优势种为刀鲚、鲫等,人工放养的鲢、鲫、鲤、鳊是主要的经济种类,水质污染等环境的恶化,加上过度捕捞等人为因素,目前多样性指数为 1.899 6,比 1959 年调查的下降了 49%,均匀度也相应降低,优势度则由 1959 年的 0.034 上升为 0.226 4^[21].

上海淀山湖从时间变化来看,可以分为丰水期(6~9 月)、平水期(3~5 月和 10~11 月)和枯水期(12 月~次年 2 月);其中,丰水期水质最好,枯水期水质指标最差,是全年水质污染最严重的时期^[22].结合上海市 1997~2007 年各月平均气温资料^[23]以及我国通常采用的“候温四季划分法”,上海

12 月~次年 2 月为冬季,3~5 月为春季,6~9 月为夏季,10~11 月为秋季,两者高度统一,本研究即采用上述四季划分法.本实验共设置 7 个样点(图 1 和表 1).

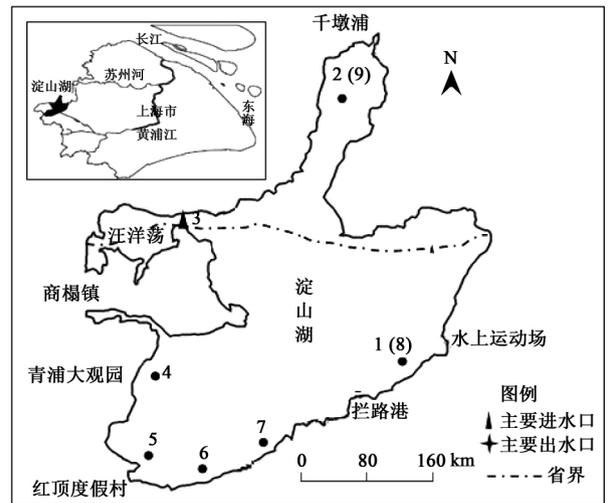


图 1 淀山湖初级生产力调查样点分布示意

Fig. 1 Sites of primary productivity survey in Dianshan Lake

表 1 淀山湖浮游植物初级生产力调查样点位置¹⁾

Table 1 Location of primary productivity of phytoplankton sampling sites in Dianshan Lake

样点编号	位点	纬度	经度
S1 (S8)	东方绿舟	31°05′58″N	120°59′33″E
S2 (S9)	千墩浦前置库	31°11′13″N	120°58′52″E
S3	大朱砂前置库	31°08′20″N	120°55′15″E
S4	金商公路近岸水域	31°05′31″N	120°54′50″E
S5	威尼斯	31°05′00″N	120°55′03″E
S6	318 国道水域	31°05′00″N	120°55′09″E
S7	原网箱养殖区域	31°04′56″N	120°56′22″E

1) S1~S7 挂瓶水深为 0.3 m; S8、9 分别是 S1、S2 的垂直对照

1.2 实验方法

黑白瓶法测定初级生产力是通过测定水中溶氧量变化,当带有浮游生物样品的黑白瓶悬挂水中曝光时,黑瓶中的浮游植物由于得不到光照,黑瓶中的溶氧将会减少.与此同时,白瓶的浮游植物在光照条件下,光合作用与呼吸作用同时进行,白瓶中的溶氧量一般会明显增加,假定光照与黑暗条件下的呼吸强度相等,就可根据挂瓶曝光期间的溶氧变化计算出光合作用与呼吸作用的强度.根据初始瓶、黑瓶、白瓶溶氧量,即可求得净初级生产量、呼吸量、总初级生产量.每个样点悬挂 2 组黑白瓶,最后计算结果取其平均值.水中溶氧测定采用碘量法^[24],采样于每月下旬晴天进行.

水体中最大初级生产力水层常在 0.5 倍透明度上下^[25], 淀山湖 0 ~ 0.5 m 水层对水柱初级生产力贡献最大^[26]. 彭刚等^[27]在漏湖测定初级生产力时发现: 漏湖平均透明度为 0.45 ~ 0.5 m 之间, 由于深度增加, 光照减弱, 初级生产力明显下降, 从水层 0.5 m 开始向下, 黑瓶所测溶氧为零. 淀山湖平均透明度为 0.58 m, 部分样点不足 0.5 m, 为测定真光层内初级生产力值, 选定 0.3 m 为挂瓶深度(0.5 m 为垂直对照)具一定代表性. 黑白瓶在水体中曝光 24 h 后用碘量法测定瓶中溶解氧, 转换成初级生产力. 采样同时测定水温、pH、透明度等指标. 水样采集、叶绿素值测定和浮游植物数量种类鉴定参考文献[28 ~ 30].

1.3 数据分析

1.3.1 溶氧计算和换算

在碱性溶液中, 水样中的溶解氧可与氢氧化锰生成碱性氧化锰[MnO(OH)₂]棕色沉淀, 加入硫酸后, MnO(OH)₂可将 KI 氧化, 析出与溶氧量当量数相等的碘. 用硫代硫酸钠标准液滴定析出的碘, 根据硫代硫酸钠的用量, 计算出水样中溶氧量的含量. 公式如下:

$$\text{溶解氧}(\text{O}_2) = \frac{c_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4} \times V_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4} \times 8 \times 1000}{100} (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$$

式中, $V_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4}$ 为滴定水样时消耗的硫代硫酸钠的溶液体积, L; 8 为氧(1/2 O)的摩尔质量, $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$; 100 为所取水样的体积, mL; $c_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4}$ 为标定好的标准硫代硫酸钠的浓度, $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

各挂瓶水层日生产量的计算方法:

$$\text{PG} = (\text{LB} - \text{DB}) / \Delta t; R = (\text{IB} - \text{DB}) / \Delta t;$$

$$\text{PN} = (\text{LB} - \text{IB}) / \Delta t$$

式中, LB 为白瓶曝光后溶氧量, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; IB 为初始溶氧量, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; DB 为黑瓶曝光后溶氧量, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 把氧量换算成固定的碳值, 乘以系数 0.35^[27], PN 为净初级生产量(以 C 计, 下同), $\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$; R 为呼吸耗氧量, $\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$; PG 为总初级生产量, $\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$; Δt 为曝光时间, d.

呼吸过程中除浮游植物本身耗氧外, 还包括细菌、浮游动物等的耗氧, 取样中异养生物的数量变化会使呼吸消耗偏离正常值, 尤其细菌在 11 ~ 12 h 之间消耗的氧往往可达到总呼吸量的 40% ~ 60%. 因此所测得的净产量是整个浮游生物群的净产量, 而远低于浮游植物本身的净产量^[31], 下文提到的初级生产力为总初级生产力.

1.3.2 相关统计分析

采用 SPSS Pasw Statistics 18 软件进行相关性检验分析.

2 结果与分析

2.1 初级生产力时间变化

不同时期淀山湖浮游植物初级生产力对比(见表 2)发现随时间变化呈明显的递增趋势, 过去 25 a 浮游植物年生产力变化, 以 1985 ~ 1986 年为参照, 1987 ~ 1988 年仅是前者的 1.2 倍, 而 2009 ~ 2010 年间增加近 10 倍. 分析增长的原因主要有以下 3 个方面.

(1) 浮游植物数量的明显增加可能是生产力变化的主导原因. 2009 年 4 月 ~ 2010 年 3 月采样调查共检测到浮游植物 8 门 128 属 395 种(包括变种和变型), 种类数远多于 1991 ~ 1992 年调查所得的 98 种和 2005 年的 160 种^[18].

(2) 水生维管束植物的大幅度减少. 1999 年调查结果显示湖中分布有 26 种水生维管束植物, 优势种为苦草、范草、马来眼子菜、芦苇等. 2000 年沉水植物 20 种, 主要以苦草、轮叶藻为优势种, 分布面积不断减少, 沿岸带主要是芦苇、茭白和凤眼莲^[32]. 水生维管束植物的减少, 无论在光辐射还是在营养物质的供应上都对浮游植物有利.

(3) 人口的增长. 由于周围人口的逐年增加以及湖上航运的频繁, 从而增加了生活污水、工业废水等的流入量, 加速了富营养化过程, 这个最终也促进了浮游植物数量的增加.

表 2 淀山湖不同年份初级生产力变化

Table 2 Changes of primary productivity in different years in Dianshan Lake

年份	1985 ~ 1986	1987 ~ 1988	1991 ~ 1992	2009 ~ 2010
初级生产力 / $\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$	26.8	32.5	104.39	289.86

2009 ~ 2010 年淀山湖浮游植物初级生产力值四季变化规律较为明显, 夏季 [$0.95 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$] > 冬季 [$0.83 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$] > 春季 [$0.77 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$] > 秋季 [$0.62 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$], 该结果与 1987 ~ 1988 年季节变化规律相同(图 2). 浮游植物生产量的季节分布主要取决于水温, 对富营养型水体而言, 温度与生产量之间常表现为正相关, 即在夏季最高. 蔡后建等^[25]对太湖梅梁湾口浮游植物初级生产力及其相关因素关系研究结果表明, 浮游植物初级生产量及相关水温的变化中, 逐月浮游植物生

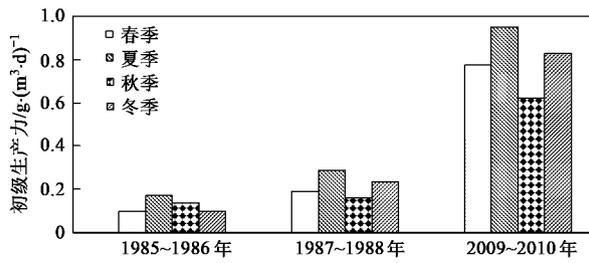


图2 淀山湖浮游植物初级生产力不同年份季节变化

Fig.2 Changes in primary productivity of phytoplankton in four seasons in different years of Dianshan Lake

产量与水温有相似的变化趋势,全年初级生产力主要集中在夏季,这与本实验研究结果一致.从表3可知,淀山湖初级生产力的时间变化与水温变化呈显著正相关,相关系数为0.598,这与卢子园等^[26]于2008年所测定的淀山湖初级生产力结果相符.

室内模拟实验表明,过高的温度可抑制水体的

初级生产力,单位叶绿素 a 的日均毛生产量在温度 24℃ 附近有最大值.2009 年淀山湖全湖水温较高时段出现在 6~8 月,平均为 27.1、29.9 和 29.0℃,此时藻类生长可能受抑制,密度较春季各月均低,生产力值也降低.9 月淀山湖蓝藻水华暴发,蓝藻门微囊藻 (*Microcystis flosaquae*) 成为全湖优势种类,致使全湖浮游植物平均密度为全年最大,高达 81.44×10^6 cells·L⁻¹,初级生产力值也为全年最高,达到 2.995 g·(m³·d)⁻¹,较 6~8 月均值高出 43%,这与已有研究不同^[25],可能跟不同调查期间蓝藻水华发生状况有关.商兆堂等^[33]在研究气候变化与太湖蓝藻暴发的关系中发现,不同藻类对水温由低到高的适应顺序是:硅藻、绿藻、蓝藻.随着水温的升高,硅藻在水温为 25℃ 时,即会被绿藻代替,水温为 33~35℃ 时,绿藻又会为蓝藻所代替.适宜蓝藻生长发育,引起暴发的天气类型是温度偏高、降水量偏少、日照时数偏多,温度变化对藻类群落结构产生影响.

表3 初级生产力与环境因子的相关系数¹⁾

Table 3 Correlation of primary productivity and environmental factors

参数	叶绿素 a	藻类密度	透明度	溶解氧	温度	酸碱度 pH
PG	0.601 **	0.525 **	0.239 *	0.01	0.598 **	0.405 **
PN	-0.041	0.013	-0.319 **	-0.662 **	0.488 **	0.019
R	0.476 **	0.294 **	0.117	0.677 **	0.452 **	0.388 **

1) ** 表示 0.01 显著水平; * 表示 0.05 显著水平

2.2 初级生产力空间变化

2.2.1 平面分布

淀山湖各位点初级生产力周年逐月变化特征如图3.

就淀山湖浮游植物初级生产力的水平分布来看,南北部生产力值较高,东西部相对较低,各位点全年平均初级生产力变化范围为 0.482~1.534

g·(m³·d)⁻¹之间,各点初级生产力存在波动(表4).

最高点位南部 S7,由于围网养鱼等历史原因,鱼类诱饵、排泄物等增加了湖水有机质含量,藻类适于在有机质相对丰富的环境中生长,密度较高,生产力较高.其次为北部位点 S2,0.992 g·(m³·d)⁻¹,处于淀山湖湖湾最深处,藻类易于在该点聚集,生产力

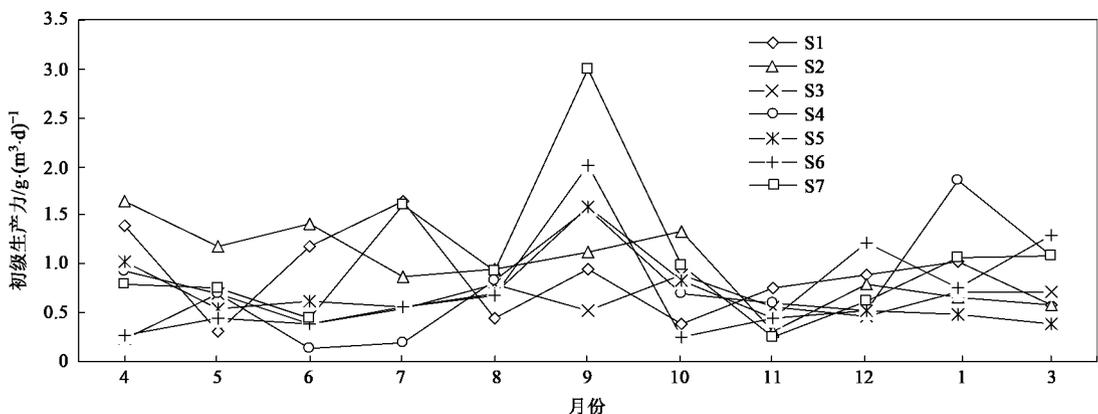


图3 淀山湖初级生产力逐月平面变化

Fig.3 Level variation of primary productivity every month at Dianshan Lake stations

也相对较高,这可能跟水体流动方向和风向等因素有一定关系.最低值位于 S3, S3 是淀山湖西部的一个重要进水口,水体从上游入湖,水质更新较快,藻类生长受外来水质影响较大,全年变化趋势与其他各点位不尽相同,表现出自身明显的波动规律,以春季最高,冬季最低.

表 4 各样点初级生产力统计学分析¹⁾

Table 4 Statistical analysis of primary productivity in each site

样点编号	均值	标准差	极小值	极大值	秩均值
S1	2.71	1.16	0.89	4.68	4.60
S2	2.83	1.19	0.89	4.68	4.70
S3	1.54	0.57	0.68	2.55	2.55
S4	2.36	1.57	0.39	5.30	3.90
S5	2.01	1.04	1.11	4.54	3.45
S6	2.18	1.63	0.73	5.73	3.95
S7	3.03	2.22	0.71	8.56	4.85

1) $n = 22$ (各样点各月 2 个重复, 2010 年 2 月因连续降雨实验数据缺失)

其中,湖西南部的 S5、S6 与 S7 比较一致,均在 9 月形成一个明显的夏季高峰,其他各月波动范围不大.湖东南部 S1 与北部 S2 是全湖 9 月调查期间仅有的 2 个未形成水华的点位,前者于 2009 年 4 月和 7 月形成两生产力高峰,后者则以 2009 年 4 月、6 月和 10 月的初级生产力值明显高于其他各月. S4 除 2009 年 9 月外,还于 2010 年 1 月出现初级生产力次高峰.

Friedman 检验是利用秩实现对多个总体分布是否存在显著差异的非参数检验方法,给定的显著性水平为 0.05,其原假设是:多个配对样本来自的多个总体分布无显著差异.本实验计算结果得 $p = 0.196 > 0.05$,不能拒绝原假设,即认为各样点的秩不存在显著性差异.

2.2.2 垂直分布

以 S1 与 S2 均值为表层以下 0.3 m 处初级生产力, S8 与 S9 均值为表层以下 0.5 m 处初级生产力.在相同点位,影响水柱初级生产力的主要因素是水下光强,浮游植物光能可得性是制约初级生产力的一个重要因素.刘镇盛等^[34]研究表明,无论是静止还是小水流、大水流状态,水下光强随深度都是按指数规律衰减.周年统计显示,在垂直空间分布上,淀山湖叶绿素 a 以水下 0.3 m 处浮游植物高于 0.5 m 处约 11%,前者年均 $20.73 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,后者年均 $18.67 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

初级生产力值与叶绿素值变化趋势相仿,以水下 0.3 m 处较 0.5 m 处高,两者平均值分别为 0.89

$\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $0.79 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,前者高出约 12.7%. 2009 年夏季初级生产力反以水下 0.5 m 处高出 0.3 m 处约 8.4%,该结果符合相关研究^[35],夏季水表面由于光抑制作用初级生产力反而较低,强烈的光辐射引起表层水体升温,同时也对其中的浮游植物产生光抑制,导致表层水中叶绿素浓度的下降. 2010 年 3 月两水层生产力基本相同,与叶绿素测定结果一致(图 4).

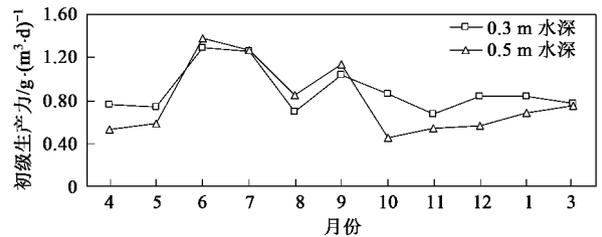


图 4 淀山湖初级生产力逐月垂直变化

Fig. 4 Vertical changes of primary productivity every month in Dianshan Lake

3 讨论

3.1 叶绿素 a 与初级生产力

水体中各种藻类所含色素有所区别,但叶绿素 a 是所有藻类主要共同色素.叶绿素 a 是反映浮游植物含量的一个参数,因此通过水中叶绿素 a 可以反映和验证生产量^[36].叶绿素 a 值基本反映了水域浮游植物的现存生物量,其分布体现出水体中浮游植物的丰度及其变化规律.初级生产力反映了水域初级生产者通过光合作用生产有机碳的能力.叶绿素 a 和初级生产力的研究见于内陆湖泊水库、江口、近海海域以及南极洲^[37-40]等各个领域.

调查期间,叶绿素 a 月均值变化范围 $4.28 \sim 58.98 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,全年平均为 $20.56 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,夏季 ($25.4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$) > 春季 ($20.8 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$) > 冬季 ($17.9 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$) > 秋季 ($9.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$),最高值 $59.00 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 出现在 9 月,最低值 $4.28 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 出现在 11 月(图 5).叶绿素 a 与初级生产力变化规律基本相仿,这与两者的相关性分析检验结果一致,初级生产力与叶绿素 a (双侧)检验得 Pearson 相关系数为 0.601 ($p < 0.01$),见表 4.春季叶绿素 a 值高于冬季,生产力值反以冬季较高,这可能跟浮游植物群落结构和优势种类有较大关系.

结合藻种鉴定发现,淀山湖春季以隐藻门的尖尾蓝隐藻 (*Chroomonas acuta* Uterm) 为主要优势种,冬季多以硅藻为主,硅藻数量暖季少冷季多,可能是

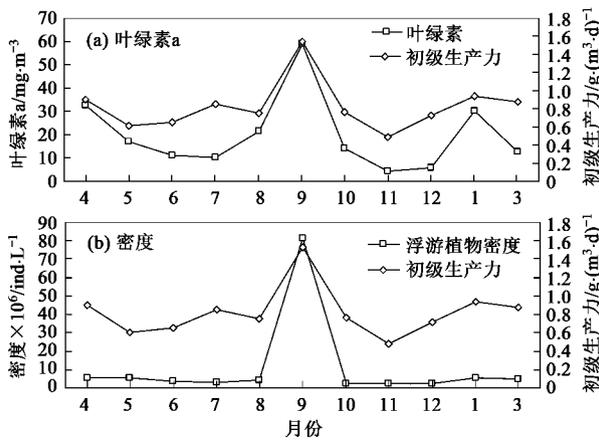


图 5 淀山湖浮游植物叶绿素 a 及密度与初级生产力月变化

Fig. 5 Monthly changes in Chlorophyll a and density of phytoplankton and primary productivity in Dianshan Lake

因为硅藻不适宜在高温环境中生存. 一方面, 隐藻门种类为单细胞, 细胞长椭圆形或卵形, 粒径微小. 硅藻门种类则通常形体较大, 每个藻体由多个细胞构成, 藻类个体为链状、杆状或群体, 星杆藻属 (*Asterionella* sp.) 和直链藻属 (*Melosira* sp.) 为淀山湖冬季常见种类. 由于种类和形体上的差别, 就单个藻体而言, 上述硅藻门优势藻种内部色素含量多于隐藻门种类. 另一方面, 硅藻光合作用色素种类较多, 除叶绿素 a 还有叶绿素 c1、c2 以及 β 胡萝卜素、岩藻黄素、硅藻黄素等. 因此, 尽管春季叶绿素 a 值高于冬季, 初级生产力反以冬季较高, 可能跟浮游植物群落结构和优势种类变化有较大关系. 水华暴发之后, 浮游植物大量死亡, 水质急剧下降. 进入秋季, 尖尾蓝隐藻再度成为优势种类, 此时浮游植物密度和叶绿素值均为全年最低, 初级生产力也降至最低.

初级生产力是浮游植物通过光合作用生产有机物的速度, 与浮游植物现存量叶绿素 a 以及光合作用速率有关, 但是浮游植物现存量与初级生产力之间并不一定具有某种线性关系^[41]. 可以看出, 初级生产力与叶绿素的相关性较为显著, 其相关系数为 0.381, 概率 $p < 0.01$. 初级生产力与浮游植物密度也有一定的相关, 其相关系数为 0.259, 概率 $p < 0.01$. 这说明, 浮游植物的生物量 (或现存量) 与其生产量之间存在着一定的正相关. 相较于淀山湖浮游植物密度, 叶绿素 a 能更好地反应初级生产力状况 (图 6 和图 7).

3.2 浮游植物密度与初级生产力

初级生产力高低主要由初级生产者数量多少、生物量大小来决定, 随着浮游植物数量的变化而

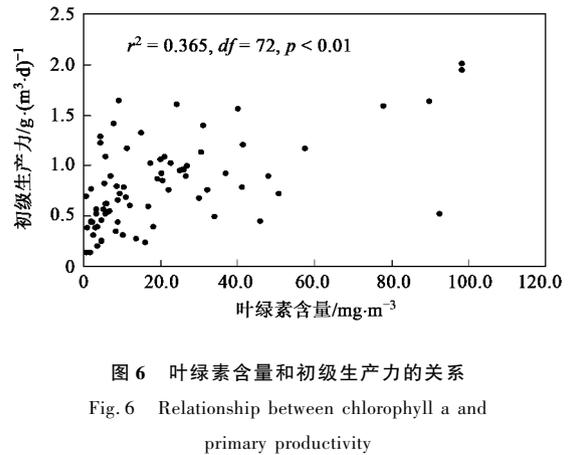


图 6 叶绿素含量和初级生产力的关系

Fig. 6 Relationship between chlorophyll a and primary productivity

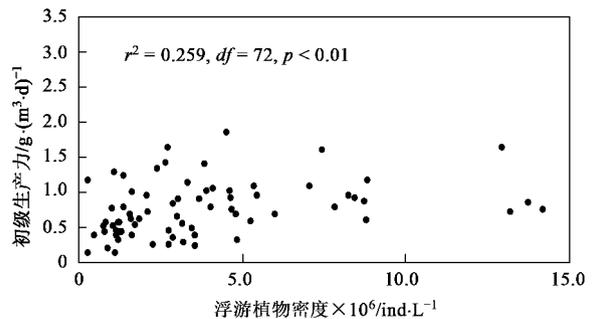


图 7 藻类密度和初级生产力的关系

Fig. 7 Relationship between phytoplankton density and primary productivity

变化.

淀山湖各月初级生产力与浮游植物密度的 Pearson 相关系数为 0.525 ($p < 0.01$), 为极显著正相关. 浮游植物密度夏季 ($23.06 \times 10^6 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$) > 春季 ($5.40 \times 10^6 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$) > 冬季 ($3.75 \times 10^6 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$) > 秋季 ($2.33 \times 10^6 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$), 与初级生产力变化不完全一致, 说明藻类初级生产力由浮游植物数量决定, 同时还受到其他理化因子如水温、光照、营养盐等各方面因素影响.

2009 年 9 月浮游植物密度较前后月份增长 20 余倍, 初级生产力仅为 8、10 月的 2 倍左右 (图 5), 结合现场采样发现, 水华暴发期间, 微囊藻属 (*Microcystis* sp.) 单个或群体细胞密布水体表面, 在其有限空间内彼此挤压, 表层以下水体基本不透光, 光照是浮游植物进行光合作用的先决条件, 下层藻体由于受到光的竞争使其生产力受到抑制, 初级生产力主要产自可接受光照的那部分藻类细胞的光合作用.

初级生产力在全湖不同点位的高低变化受浮游植物密度的影响, 密度分布与盛行风向有关. 2009

年 8~9 月期间,偏东风及北风的影响是淀山湖西南部微囊藻聚集形成水华的重要原因之一。秋冬两季盛行西北风,浮游植物多聚集于东部、南部各点;春夏两季盛行东南风时,则多聚集于西部及北部区域。

结合叶绿素 a、浮游植物密度与初级生产力之间的相关性研究,浮游植物的生物量(或现存量)与其生产量之间存在着一定的正相关。浮游植物的初级生产力高低反映当下水体中浮游植物生物量大小,应用初级生产力指标推断藻类数量变化以或发生水华的最大可能性在夏季。

3.3 pH 值、透明度(SD)等理化指标

初级生产力与 pH 呈显著相关(表 3),淀山湖平均 pH 值为 8.1,也即中性偏碱性的水体较适合藻类生长。刘春光等^[42]研究发现,淡水藻类在不同 pH 值下的生长和种类变化的研究表明,在 pH 值 8.0~9.5 的范围内,pH 8.5 下藻类生长状况最好。透明度,即透光的程度是一个能较为直观反映水质的常用物理特性指标,它取决于水体的浮游生物和有机及无机悬浮物的数量。悬浮物浓度增加,光学衰减系数逐渐增大,真光层深度逐渐变浅,光学衰减系数、真光层深度与悬浮物浓度存在很好的相关性。淀山湖水体透明度与初级生产量呈正相关($p < 0.05$),这与已有报道^[25,26]相符。大多数水体,限制初级生产力的营养物质是氮和磷,关于淀山湖氮、磷与初级生产力的相关关系有待于今后进一步研究分析。

4 结论

(1) 淀山湖不同时期初级生产力增加的可能原因有:浮游植物数量明显增加,水生维管束植物的大幅度减少以及水体富营养化程度的加深。

(2) 初级生产力四季变化规律为夏季 $[0.95 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}] >$ 冬季 $[0.83 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}] >$ 春季 $[0.77 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}] >$ 秋季 $[0.62 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}]$,生产量的时间变化与温度呈显著正相关,跟浮游植物群落结构和优势种类更替也有较大关系。

(3) 从水平分布上,南北部样点生产力值较高,东西部相对较低,各样点不存在显著性差异。

(4) 从垂直分布上,初级生产力以水下 0.3 m 处较 0.5 m 处高约 12.7%,夏季水体表层由于光抑制作用初级生产力反而低。

(5) 初级生产力与叶绿素 a、浮游植物密度均呈极显著正相关($p < 0.01$),和透明度、pH 值具有一定的正相关,叶绿素 a 能较好地反映初级生产力状

况。生产力受水体生物因子以及理化因子的共同作用。

致谢:本实验部分研究数据由杨虹提供,沈会涛在文章修改中提供宝贵意见,特此致谢!

参考文献:

- [1] Redfield A C, Ketchum B H, Richards F A. The influence of organisms on the composition seawater [A]. In: Hill M N. The Sea[C]. New York: John Wiley, 1963. 26-77.
- [2] 何志辉. 中国湖泊水库的初级生产力及其能量转化效率[J]. 水产科学, 1987, 6(1): 24-30.
- [3] Lewis W M. Primary production in the plankton community of a tropical lake [J]. Ecological Monographs, 1974, 44(4): 377-409.
- [4] Schindler D W. Factors regulating phytoplankton production and standing crop in the world's freshwaters [J]. American Society of Limnology and Oceanography, 1978, 23(3): 478-486.
- [5] Goulder R. Interactions between the rates of production of a freshwater macrophyte and phytoplankton in a pond [J]. Copenhagen, 1969, 20: 300-309.
- [6] Callier C, Modenutti B, Queimaliños C, et al. Production and biomass of picophytoplankton and larger autotrophs in Andean ultraoligotrophic lakes: differences in light harvesting efficiency in deep layers. [J]. Aquatic Ecology, 2007, 41: 511-523.
- [7] Ostrom N E, Russ M E, Field A, et al. Ratios of community respiration to photosynthesis and rates of primary production in Lake Erie via oxygen isotope techniques[J]. Chemical Geology, 2009, 269(1-2): 3-11.
- [8] Vanni M J, Bowling A M, Dickman E M, et al. Nutrient cycling by fish supports relatively more primary production as lake productivity increased[J]. Ecology, 2006, 87(7): 1696-1709.
- [9] 刘子琳, 陈建芳, 陈忠元, 等. 白令海光合浮游生物现存量与初级生产力[J]. 生态学报, 2006, 26(5): 1345-1351.
- [10] 唐世林, 陈楚群, 詹海刚. 海洋初级生产力的遥感研究进展[J]. 台湾海峡, 2006, 25(4): 591-597.
- [11] 吕昌伟, 何江, 梁英, 等. 岱海硅藻类浮游植物初级生产力 Si 限制初探[J]. 环境科学, 2010, 31(3): 639-644.
- [12] 王骥, 梁彦龄. 用浮游植物的生产量估算武昌东湖鲢鳙生产潜力与鱼种放养量的探讨[J]. 水产学报, 1981, 5(4): 343-350.
- [13] 朱爱民, 刘家寿, 胡传林, 等. 湖北浮桥水库浮游植物初级生产力及其管理[J]. 湖泊科学, 2007, 19(3): 340-344.
- [14] 韩德举, 吴生桂, 邹清, 等. 陆水水库的浮游生物及营养类型[J]. 湖泊科学, 1996, 8(4): 351-358.
- [15] Vaillancourt R D, Sambrotto R N, Green S, et al. Phytoplankton biomass and photosynthetic competency in the summer time Mertz Glacier Region of East Antarctica[J]. Deep-Sea Research II, 2003, 50: 1415-1440.
- [16] 王骥. 浮游植物的初级生产力与黑白瓶测氧法[J]. 淡水渔业, 1980, (3): 24-28.
- [17] 由文辉. 淀山湖的浮游植物及其能量生产[J]. 海洋湖沼通报, 1995, 1: 47-53.

- [18] 宋永昌. 淀山湖富营养化及其防止研究[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1992.
- [19] 车生泉, 杨知洁, 倪文峰. 上海淀山湖沿岸带生态修复景观模式研究[J]. 中国园林, 2008, (5): 9-14.
- [20] 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.
- [21] 孙菁煜, 戴小杰, 朱江峰, 等. 淀山湖鱼类多样性分析[J]. 上海水产大学学报, 2007, 16(5): 454-458.
- [22] 阮仁良, 王云. 淀山湖水环境质量评价及污染防治研究[J]. 湖泊科学, 1993, 5(2): 153-158.
- [23] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1997-2007.
- [24] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法[M]. (第三版). 北京: 中国环境科学出版社, 1989. 246-248.
- [25] 蔡后建, 陈宇伟. 太湖梅梁湾口浮游植物初级生产力及其相关因素关系的研究[J]. 湖泊科学, 1994, 6(4): 340-345.
- [26] 卢子园, 王丽卿, 季高华, 等. 淀山湖基于初级生产力的鲢鳙富营养化控制[J]. 生态学杂志, 2010, 29(7): 1365-1370.
- [27] 彭刚, 李潇轩, 郝忱, 等. 溧湖夏季浮游植物初级生产力测定[J]. 渔业经济研究, 2007, 1: 46-48.
- [28] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [29] 周凤霞, 陈剑虹. 淡水微型生物图谱[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [30] 韩茂森. 淡水浮游生物图谱[M]. 北京: 农业出版社, 1980.
- [31] 阎希柱. 初级生产力的不同测定方法[J]. 水产学杂志, 2000, 13(1): 81-86.
- [32] 郑晓红. 影响淀山湖水质变化的因素分析[J]. 干旱环境监测, 1999, 12(4): 226-228.
- [33] 商兆堂, 任健, 秦铭荣, 等. 气候变化与太湖蓝藻暴发的关系[J]. 生态学杂志, 2010, 29(1): 55-61.
- [34] 刘镇盛, 张经, 蔡昱明, 等. 三门湾夏季浮游植物现存量 and 初级生产力[J]. 东海海洋, 2003, 21(3): 24-32.
- [35] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 悬浮物浓度对水下光照和初级生产力的影响[J]. 水科学进展, 2004, 15(5): 615-620.
- [36] 张丽琴. 藻类植物系统分类初探[J]. 河南教育学院学报(自然科学版), 1997, 6(4): 78-79.
- [37] 王骥, 沈国华. 武汉东湖浮游植物的初级生产力及其与若干生态因素的关系[J]. 水生生物学, 1982, 7(3): 295-309.
- [38] 周伟华, 袁翔城, 霍文毅, 等. 长江口邻域叶绿素 a 和初级生产力的分布[J]. 海洋学报, 2004, 26(3): 143-150.
- [39] 朱明远, 王艳香, 李宝华. 秋季渤海水域中叶绿素含量的测定及初级生产力的估算[J]. 海洋湖沼通报, 1982, (3): 42-46.
- [40] Smith W O, Marrab Jr J, Hiscock M R, *et al.* The seasonal cycle of phytoplankton biomass and primary productivity in the Ross Sea, Antarctica [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2000, 47(15-16): 3119-3140.
- [41] 沈志良. 长江口海区理化环境对初级生产力的影响[J]. 海洋湖沼通报, 1993, (1): 47-50.
- [42] 刘春光, 金相灿, 孙凌, 等. pH 值对淡水藻类生长和种类变化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 294-298.