

# 淀山湖浮游藻类群落的早期增长

程曦<sup>1,2</sup>, 李小平<sup>1\*</sup>

(1. 华东师范大学河口海岸国家重点实验室, 上海 200062; 2. 上海市环境科学研究院, 上海 200233)

**摘要:**对 2004~2009 年淀山湖浮游藻类群落生物量[以叶绿素 a(Chla)表示]随时间的变化进行了数学模拟. 模拟结果表明, Logistic 增长模型能够很好地描述淀山湖浮游藻类群落春季和夏季的早期增长. 一般说来, 淀山湖春季以硅藻和绿藻为主的浮游藻类群落于 2 月下旬进入指数级增长, 到 3 月上旬浮游藻类密度已经达到始盛点的 2 倍, 浮游藻类密度的翻倍时间仅为 18 d, 到 3 月中旬浮游藻类群落的增长速度达到最大值  $29.4 \mu\text{g} \cdot (\text{L} \cdot \text{月})^{-1}$ ; 6 月可能形成浮游藻类水华. 淀山湖夏季以蓝藻为主的浮游藻类群落于 6 月中下旬进入指数级增长, 到 7 月中旬浮游藻类密度已经达到始盛点的 2 倍, 浮游藻类密度的翻倍时间为 26 d; 到 7 月下旬浮游藻类群落的增长速度达到最大值  $22.8 \mu\text{g} \cdot (\text{L} \cdot \text{月})^{-1}$ , 8~9 月可能形成蓝藻水华. 淀山湖浮游藻类群落早期增长的一般规律, 可以为浮游藻类水华的早期预警和预防提供科学依据.

**关键词:**浮游藻类群落; 早期增长; Logistic 增长模型; 藻类水华; 淀山湖

中图分类号: X171; Q178 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)11-3215-08

## Early Growth of Phytoplankton Community in Dianshan Lake

CHENG Xi<sup>1,2</sup>, LI Xiao-ping<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. Shanghai Academy of Environmental Science, Shanghai 200233, China)

**Abstract:** Seasonal variation of phytoplankton community biomass (Chla) in Dianshan Lake was simulated based on data of 2004-2009. The result showed that early growths of the phytoplankton community in spring and summer seasons could be well described by the Logistic growth model. General speaking, phytoplankton community dominated by diatom and green algae may enter its exponential phase in the late February, doubling its density within 18 days, and reaching its maximum growth rate of  $29.4 \mu\text{g} \cdot (\text{L} \cdot \text{month})^{-1}$  in the middle of March, blooming in June. Phytoplankton community dominated by blue green algae may enter its exponential phase in the middle June, doubling its density within 26 days, and reaching its maximum growth rate of  $22.8 \mu\text{g} \cdot (\text{L} \cdot \text{month})^{-1}$  in the middle of July, blooming during August-September. The general pattern of early growth of phytoplankton community may offer sound information for early warning and prevention of algal bloom.

**Key words:** phytoplankton community; early growth; Logistic growth model; algal bloom; Dianshan Lake

浮游藻类水华发生的过程非常复杂, 不仅受到浮游藻类本身和营养物供应的影响, 还受到地理位置、流域特征等物理因素与气候变化和极端气候的影响<sup>[1, 2]</sup>, 且有极大的随机性或不确定性. 近年来, 人们花费大量精力收集了各类历史数据, 以及包括遥感影像数据在内的实际测量数据, 建立了各类耦合和/或非线性数学模型, 模拟藻类水华<sup>[3~9]</sup>, 取得了长足进展. 但人们往往忽视了一个重要事实, 这就是藻类水华(包括蓝藻水华)发生前, 必定存在一个生物量累积的过程<sup>[10, 11]</sup>. 这个过程可以简单地用藻类群落的细胞数、叶绿素含量(Chla)、其他藻类生物量指标(例如藻类干重等)的变化, 以及它们的出现频率来表征和描述. 因此, 对浮游藻类的早期生长和生长速率的变化、藻类生物量及出现频率的研究和测算, 已经成为一些发达国家和国际机构对浮游藻类(尤其是蓝藻)水华进行早期预警和控制的有效工具<sup>[12~16]</sup>.

本研究力图通过对淀山湖浮游藻类增长的实际测量, 采用数学模拟的方法计算淀山湖浮游藻类群落在生长季节的增长速率, 指数级增长的起始浓度和生物量翻倍的时间, 从而掌握淀山湖浮游藻类群落早期增长的一般规律, 以期对淀山湖和我国藻类水华的早期预警和预防提供科学依据和实用方法.

### 1 材料与方法

#### 1.1 研究区域概况

淀山湖是太湖平原地区的一个吞吐性浅水湖泊, 分属江苏昆山市和上海青浦区管辖, 地理位置为

收稿日期: 2011-01-21; 修订日期: 2011-03-30

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07106-001); 上海市环境保护局项目(沪环科 08-17)

作者简介: 程曦(1974~), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为生态环境与生态修复工程, E-mail: chengxi2000@hotmail.com

\* 通讯联系人, E-mail: lixp\_2008@hotmail.com

31°04' ~ 31°12'N, 120°54' ~ 120°01'E. 淀山湖水域面积 62 km<sup>2</sup>, 平均水深约 2.1 m, 最大水深 3.6 m, 主要接收太湖来水. 太湖水由西北向东南经急水港、大朱库等河港进入湖体, 然后经拦路港、淀浦河等河流泄入黄浦江, 停留时间约 29 d, 占黄浦江水量的 17% 左右, 是上海市的主要水源地之一. 从 1985 年淀山湖第一次大规模藻类水华算起, 经过 15 a 的营养物积累, 淀山湖生态系统发生了重大转折, 于 1999 ~ 2000 年前后由中度富营养化转变成重度富营养化. 浮游藻类群落迅速向以绿藻-蓝藻为主的群落结构演替, 夏秋季则以蓝藻为主, 已经具备了暴发大规模、大面积蓝藻水华的条件<sup>[17]</sup>.

## 1.2 研究方法与数据来源

经典的 Logistic 增长模型在模拟不同条件下各类纯种藻类<sup>[18~24]</sup>或藻类群落<sup>[25, 26]</sup>的增长方面应用广泛, 因此本研究采用经典的 Logistic 增长模型来描述淀山湖浮游藻类群落春季和夏季的早期增长, 模型模拟的时间步长按月计算, 模型公式如下:

$$\text{Chla}_t = \frac{K}{1 + a \times e^{-b \times t}} \quad (1)$$

式中,  $t$  为时间,  $\text{Chla}_t$  为时间  $t$  的浮游藻类密度 (以叶绿素浓度计,  $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ),  $K$  为最大浮游藻类密度 ( $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ),  $a$  和  $b$  为常数,  $e$  为自然对数.

Logistic 增长模型的速度函数为模型方程的一阶导数:

$$V_{\text{growth}} = \frac{d(\text{Chla}_t)}{dt} = b \times \text{Chla}_t \times \frac{K - \text{Chla}_t}{K} \quad (2)$$

Logistic 增长速度函数的最大值及其发生时间为:

$$V_{\text{Max}} = \frac{b \times K}{4} \quad (3)$$

$$t_{V_{\text{Max}}} = \frac{\ln(a)}{b} \quad (4)$$

Logistic 增长速度函数的另一重要拐点——始盛点 (增长速度增加最快) 的发生时间为:

$$t_1 = \frac{\ln(a) - 1.317}{b} \quad (5)$$

Logistic 增长模型和速度函数中最大浮游藻类密度  $K$ 、最大增长速度  $V_{\text{Max}}$  及其发生时间  $t_{V_{\text{Max}}}$ , 以及增长加速度最快的始盛点  $t_1$  是描述浮游藻类增长过程的关键参数.

本研究采用的数据主要为 2004 ~ 2009 年淀山湖的实际监测资料, 其中 2004 ~ 2006 年 Chla 月平均数据引自文献<sup>[27]</sup>; 2008 ~ 2009 年数据为作者在淀山湖的实测数据, 监测频率为每月 1 ~ 2 次; 其余

数据来源于文献<sup>[28]</sup>. 为了比较淀山湖在 20 世纪 80 年代浮游藻类群落的增长情况, 本研究还参考了文献<sup>[29]</sup>的数据和成果. 数据的采集及分析方法满足相关标准及规范的要求, Chla 的测定均采用 90% 丙酮萃取的分光光度法, 物种的鉴定采用光学显微镜. 浮游藻类增长曲线的模拟、回归方程的显著性检验 (置信区间 95%) 均采用 SPSS 15.0 软件完成.

## 2 结果与分析

### 2.1 淀山湖浮游藻类群落生物量的季节变化和垂直分布

图 1 给出了淀山湖水体浮游藻类生物量 (用 Chla 表达) 1985 ~ 1986 年<sup>[29]</sup>、2004 ~ 2006 年<sup>[27]</sup> 和 2008 ~ 2009 年 3 个不同历史时期的季节变化情况. 图 2 是用藻类细胞数量表达的 2008 ~ 2009 年度淀山湖浮游藻类生物量的变化. 如图 2 所示, 淀山湖浮游藻类生物量分别在春季和秋季经历 2 次高峰. 春夏季浮游藻类生物量高峰出现在 4 ~ 5 月, 浮游藻类群落以硅藻和绿藻为主; 秋季浮游藻类生物量高峰一般出现在 7 ~ 8 月, 浮游藻类群落以蓝藻为主; 入冬前的 11 ~ 12 月之间, 通常也会出现较高的 Chla 浓度, 多数是硅藻. 20 世纪 80 年代淀山湖浮游藻类生物量的季节变化趋势与近几年的变化趋势非常相似, 不同的是, 浮游藻类生物量的数量级增加很大. 20 世纪 80 年代, 浮游藻类生物量的最大范围为 10  $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  左右, 而近几年浮游藻类生物量的最大范围剧增到 60  $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ . 浮游藻类生物量的这种历史变化也反映了淀山湖水体的营养状态发生了剧烈变化, 富营养化程度急剧恶化.

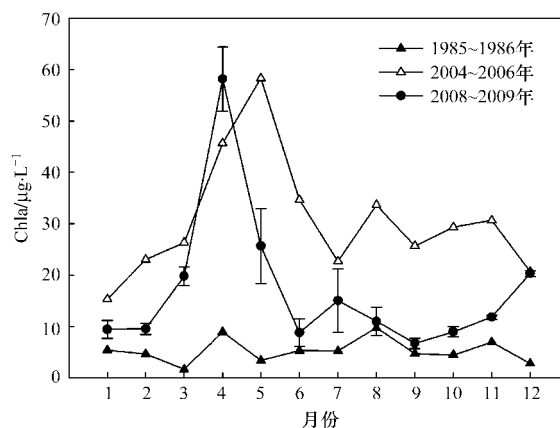


图 1 淀山湖水体浮游藻类生物量 (Chla) 在 3 个不同历史时期的季节变化

Fig. 1 Seasonal variations of algal biomass (Chla) at 3 different periods in Dianshan Lake

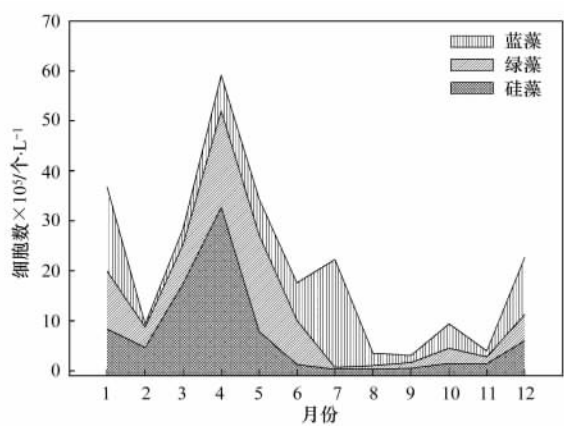


图2 2008~2009年淀山湖浮游藻类群落季节变化  
Fig. 2 Seasonal variations of algal community at the periods of 2008-2009 in Dianshan Lake

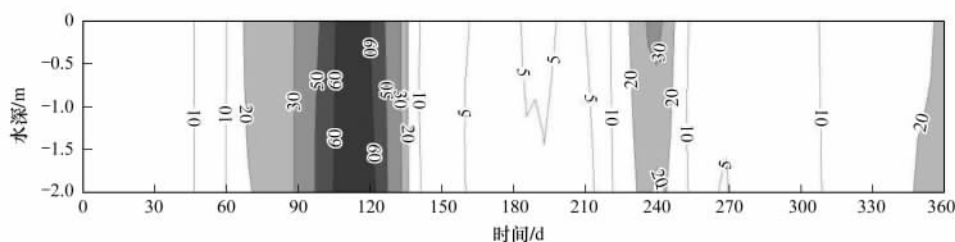


图3 2008~2009年淀山湖湖中心(4号航标) Chla 垂直分布的变化  
Fig. 3 Seasonal variations of Chla vertical distribution at the periods of 2008-2009 at the center of Dianshan Lake

型和速度函数中以 Chla 浓度表征的最大浮游藻类密度  $K$ 、最大增长速度  $V_{\text{Max}}$  及其发生时间  $t_{V_{\text{Max}}}$ , 以及增长加速度最快的始盛点  $t_1$  等描述浮游藻类增长过程的关键参数。

图4给出了经典 Logistic 增长模型模拟的浮游藻类增长曲线和增长速率曲线,模型理论计算得到的关键参数如表1所示。

| 参 数                                                                           | 模拟结果      |           |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|
|                                                                               | 春季        | 夏季        |
| 始盛点 $t_1$ /月                                                                  | 2.7       | 6.6       |
| 始盛点的浮游藻类密度 $\text{Chla}_{t_1}/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$                  | 15.7      | 16.7      |
| 始盛期浮游藻类密度的翻倍时间/(月, 翻倍天数)                                                      | 3.3, 18 d | 7.5, 27 d |
| 最大增长速度的发生时间 $t_{\text{Max}}$ /月                                               | 3.5       | 7.7       |
| 最大增长速度 $V_{\text{max}}/\mu\text{g}\cdot(\text{L}\cdot\text{月})^{-1}$          | 29.4      | 22.8      |
| 最大增长速度发生时的浮游藻类密度 $\text{Chla}_{t_{\text{Max}}}/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ | 36.2      | 38.7      |
| 可能的最大浮游藻类密度 $K/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$                                 | 74.3      | 79.0      |

Logistic 增长模型模拟的结果显示,淀山湖春季浮游藻类群落的增长速度在2月下旬(2.7, 始盛点)开始迅速增加(增长速度增加得最快),到3月

不同季节浮游藻类的垂直分布差异也很明显,图3是2008~2009年度淀山湖4号航标站的监测中发现的现象.春季浮游藻类的生物量虽然最大,但以硅藻为主的浮游藻类随水柱深度分布比较均匀;夏季浮游藻类的生物量虽然小于春季,但以蓝藻和绿藻为主的浮游藻类,特别是有些蓝藻(例如微囊藻),由于具有气囊结构(伪空胞),容易在水体表面发生聚集.一旦随风漂移到湖泊下风向的某一局部堆积,则可导致有害蓝藻水华的暴发。

2.2 淀山湖浮游藻类群落早期增长的数学模拟

使用2004~2009年间的淀山湖 Chla 指标的实际监测数据,采用 Logistic 增长模型的结果模拟和拟合.本研究主要关注淀山湖浮游藻类 Logistic 增长模

月上旬(3.3)浮游藻类密度已经达到始盛点的2倍,浮游藻类密度的翻倍时间仅为半个月,到3月中旬(3.5)浮游藻类群落的增长速度达到最大值  $29.4\mu\text{g}\cdot(\text{L}\cdot\text{月})^{-1}$ ,浮游藻类密度在6月达到最大值  $74.3\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

淀山湖夏季浮游藻类群落的增长速度在6月中下旬(6.6, 始盛点)开始迅速增加(增长速度增加得最快),到7月中旬(7.5)浮游藻类密度已经达到始盛点的2倍,浮游藻类密度的翻倍时间仅为26d,到7月下旬(7.7)浮游藻类群落的增长速度达到最大值  $22.8\mu\text{g}\cdot(\text{L}\cdot\text{月})^{-1}$ . 如果不加限制,蓝藻密度可能在秋季达到最大值  $79.0\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

模型方程的显著性检验(置信区间95%)结果显示,Logistic 模型模拟的春季和夏季浮游藻类群落的早期增长与2004~2009年的实测数据非常吻合,(春季,  $R^2 = 0.71, P < 0.05$ ; 夏季,  $R^2 = 0.9, P < 0.05$ ). 表1给出了春季和夏秋季淀山湖浮游藻类群落增长各模拟参数的对比. 由表1可见,春季浮游藻类(主要是硅藻和绿藻)增长的速度较快,夏季浮游藻类(主要是蓝藻)增长的速度相对慢一些. 增长速率存在差异的主要原因除了浮游藻类群落优势物种

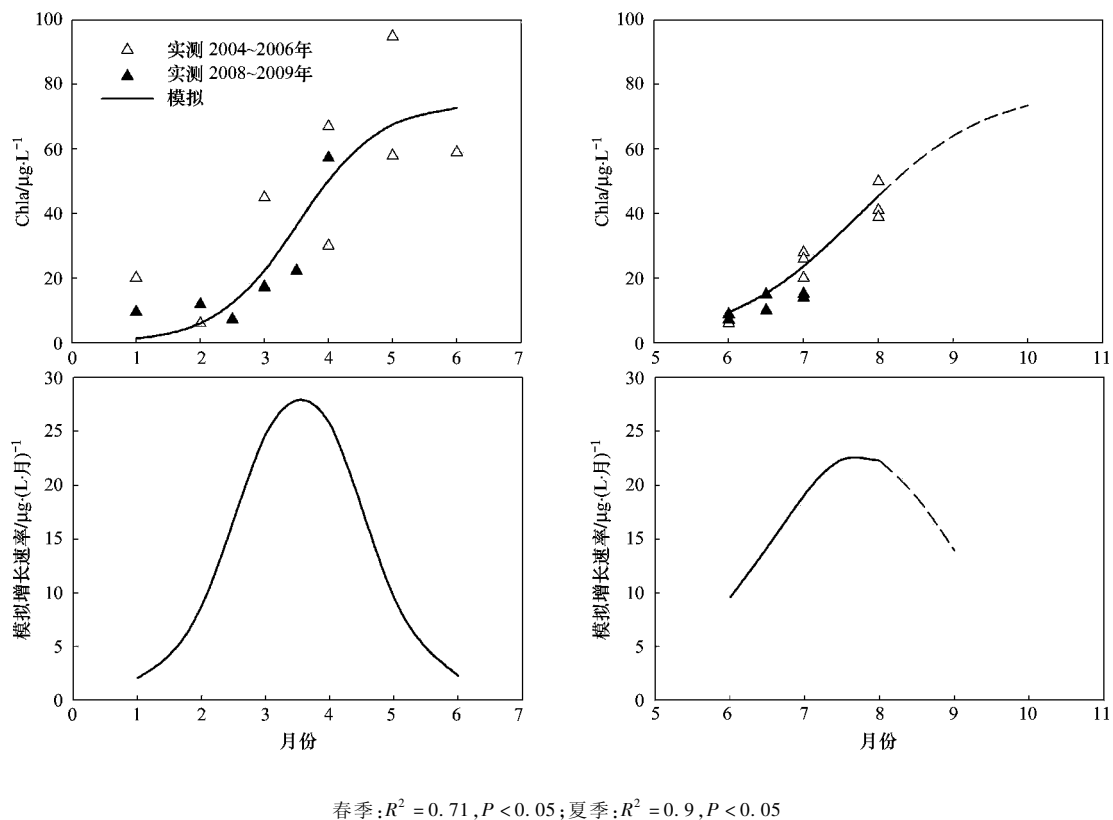


图 4 Logistic 模型模拟的淀山湖春季和夏季浮游藻类群落的早期增长

Fig.4 Early growth of phytoplankton community at spring and summer seasons simulated by Logistic growth model

不同(蓝藻的生长速度要低于硅藻和绿藻)之外<sup>[30~32]</sup>,营养物的限制(尤其是夏季水体中氮的水平较低)也可能是重要的因素。

2.3 淀山湖浮游藻类群落早期增长的累积频率

淀山湖春季和夏季浮游藻类群落早期增长 Chla 的频率分布和累积频率如图 5 所示。表 2 给出了淀山湖春季和夏季浮游藻类群落早期增长 Chla 若干重要浓度值(例如 15~16 μg·L<sup>-1</sup>和 36~38 μg·L<sup>-1</sup>)实际发生频率和累积频率。

表 2 Logistic 增长模型中若干重要的 Chla 浓度的  
实际发生频率和累积频率

| Table 2 Real probabilities of some key Chla concentrations simulated by Logistical growth model |            |                             |                            |                          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------|
| 季节                                                                                              | 增长阶段       | Chla<br>/μg·L <sup>-1</sup> | 2004~2009 年间<br>实际的发生和累积频率 |                          |
|                                                                                                 |            |                             | 发生频率<br>/%                 | 累积频率 <sup>1)</sup><br>/% |
| 春季                                                                                              | 指数级增长的起点   | 15.7                        | 1.2                        | 75.2                     |
|                                                                                                 | 最大增长速度时的浓度 | 36.2                        | 1.5                        | 46.2                     |
|                                                                                                 | 最大可能的浓度    | 74.3                        | 0.5                        | 6.2                      |
| 夏季                                                                                              | 指数级增长的起点   | 16.7                        | 2.1                        | 71.9                     |
|                                                                                                 | 最大增长速度时的浓度 | 38.7                        | 1.8                        | 20.6                     |
|                                                                                                 | 最大可能的浓度    | 79.0                        | 0.008                      | 0.04                     |

1) 累积频率系指大于某一浓度值的累积频率

3 讨论

3.1 浮游藻类水华的生物量积累过程

无论水体中营养物浓度高低、温度高低,或者是其他影响浮游藻类增长的因素强弱,藻类水华的发生都有一个生物量累积的过程。图 6 给出了我国三大湖泊和官厅水库浮游藻类增长的过程曲线<sup>[33~36]</sup>,尽管所处的地理位置和时间不同,从浮游藻类较低生物量到水华暴发无一例外地经过了一段时间的积累。这些过程一般都符合或近似符合 Logistic 增长模式,只要有较长的月平均历史数据,就可以计算出在一般情况下浮游藻类生物量随时间的变化,掌握浮游藻类增长的一般规律。从图 6 中看到,滇池 2001 年 Chla 由 1 月的 15 μg·L<sup>-1</sup>历经 4 个月增长到 5 月的 100 μg·L<sup>-1</sup> [图 6(a)];巢湖西半湖的 Chla 从 100 μg·L<sup>-1</sup>升至 200 μg·L<sup>-1</sup>用了近 2 个月的时间 [图 6(c)];官厅水库微囊藻在指数级增长时用了不到 1 个月的时间藻细胞密度翻了 1 倍,而在 6~8 月间用了 2 个月的时间藻细胞密度又翻了 1 倍 [图 6(d)]。本研究对淀山湖浮游藻类增长的计算结果表明,淀山湖春季浮游藻类群落于 2 月下旬(始盛

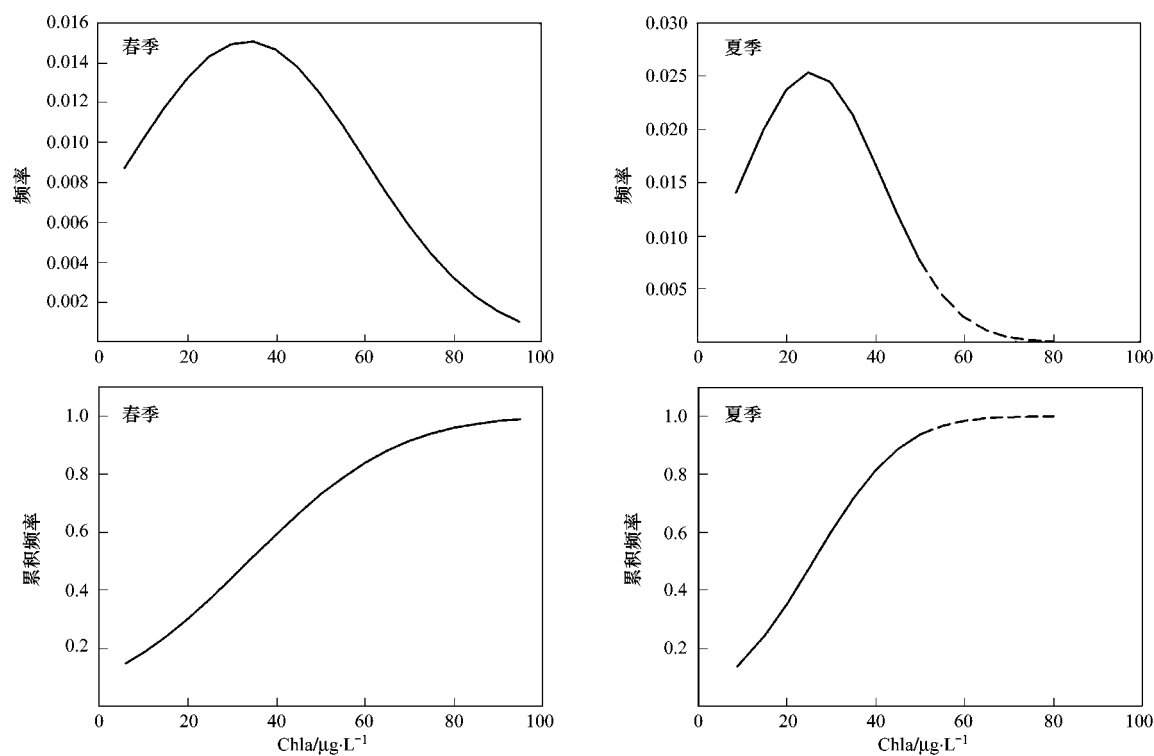


图 5 淀山湖春季和夏季浮游藻类群落早期增长阶段 Chla 频率和累积频率分布  
Fig. 5 Frequencies and cumulative frequencies of Chla of phytoplankton community at early growth stages

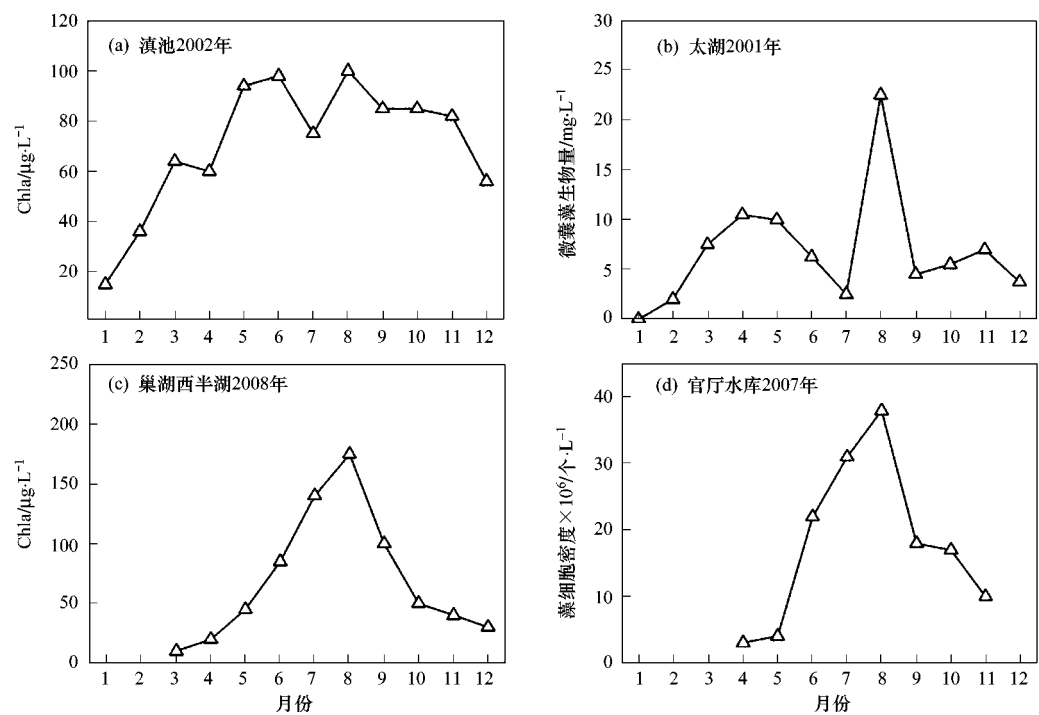
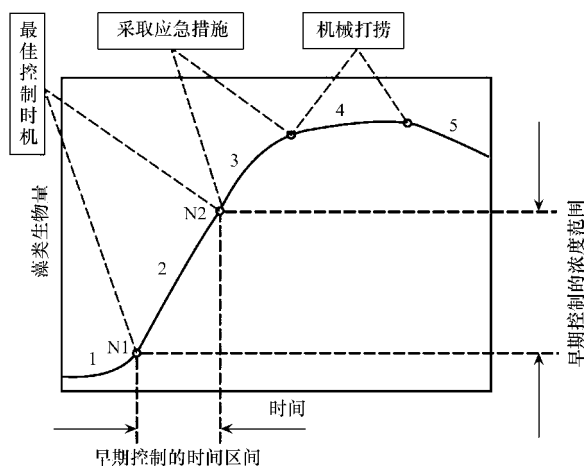


图 6 不同湖泊水库浮游藻类生物量随时间的变化  
Fig. 6 Seasonal variations of phytoplankton biomass in Dianchi Lake, Taihu Lake, West Part of Chaohu Lake, Guantian Reservoir

点)开始迅速增加,到3月上旬浮游藻类密度可达到始盛点的2倍,浮游藻类密度的翻倍时间仅为半个月,于5~6月可能形成浮游藻类水华.淀山湖夏季浮游藻类群落的增长速度在6月中下旬(始盛点)开始迅速增加,到7月中旬浮游藻类密度已经达到始盛点的2倍,浮游藻类密度的翻倍时间仅为26 d,8~9月可能形成蓝藻水华.

图7给出了浮游藻类增长的一般规律.理论上浮游藻类是水生生态系统中的初级生产力,其第一阶段(N1点之前)的增长过程很正常,也是生态系统中必不可少的组成部分.浮游藻类增长由N1点起进入指数级增长;浮游藻类增长至N2点时,增长速率达到最大,此时由于生物量过大可能暴发水华<sup>[37]</sup>.事实上,浮游藻类增长的过程可以提供早期预防和控制的实施时间和浓度范围,只要对浮游藻类增长的过程有一个全面的了解,就有可能在早期采取措施控制浮游藻类的过度增长.



N1 点为浮游藻类群落进入指数级增长的始盛点,

N2 为浮游藻类群落增长速度最大的点

图7 浮游藻类增长的一般规律

Fig. 7 General pattern of phytoplankton growth

### 3.2 浮游藻类增长过程和规律对藻类水华预警预报的意义

发达国家在运用浮游藻类增长规律,制定藻类水华安全预警值方面有许多经验.例如澳大利亚对城市水体的研究表明,在水温20℃的理想条件下(实验室培养),蓝藻密度在14~46 d内可以达到“暴发”水平( $27\,000\text{个}\cdot\text{mL}^{-1}$ ).为了安全起见藻类“水华”安全预警值( $N_t$ )一般不高于 $15\,000\text{个}\cdot\text{mL}^{-1}$ <sup>[38]</sup>.对于娱乐水体,当微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)细胞密度 $>50\,000\text{个}\cdot\text{mL}^{-1}$ 或所有蓝藻

细胞密度 $>30\,000\text{个}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时,则应采取第一级行动<sup>[13, 39]</sup>.

淀山湖浮游藻类水华的预警点也可以根据淀山湖浮游藻类增长的过程和一般规律来确定.春季2月下旬,淀山湖浮游藻类群落的增长速度开始迅速增加,增长速度增加最快,春季浮游藻类群落的增长进入始盛点,选择春季浮游藻类增长的始盛点作为该季节浮游藻类早期控制的预警点N1,早期控制预警点N1的Chla浓度约为 $16\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ;3月中旬浮游藻类群落的增长速度达到最大值,将这个时间点作为淀山湖春季浮游藻类水华控制的预警点N2,水华控制预警点N2的Chla浓度约为 $36\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ;而春季浮游藻类水华可能出现的时间为6月.淀山湖春季以硅藻和绿藻为主,蓝藻水平不高,即便形成水华,其藻毒素的水平不会很高,对饮用水源不构成威胁.淀山湖夏季浮游藻类群落的增长速度在6月中下旬开始迅速增加,选择这一始盛点作为该季节浮游藻类早期控制的预警点N1,早期控制预警点N1的Chla浓度约为 $17\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ .7月下旬浮游藻类群落的增长速度达到最大值,将这个时间点作为淀山湖夏季浮游藻类水华控制的预警点N2,水华控制预警点N2的Chla浓度约为 $38\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,蓝藻可能在局部水面聚集,随时会暴发蓝藻水华.根据世界卫生组织的估计,此时淀山湖局部水体的藻毒素可能达到 $20\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,不仅不适合作为娱乐水体,对水源地的安全也构成重大威胁;夏秋季浮游藻类水华可能出现的时间约为8月.

## 4 结论

(1)经典的Logistic增长模型能够很好地描述淀山湖浮游藻类群落春季和夏季的早期增长,模型模拟结果与实测数据非常吻合.

(2)一般说来,淀山湖春季以硅藻和绿藻为主的浮游藻类群落于2月下旬(始盛点,N1)开始迅速增加,到3月上旬浮游藻类密度可达到始盛点的2倍,浮游藻类密度的翻倍时间仅为半个月.3月中旬,浮游藻类群落的增长速度达到最大值 $29.4\mu\text{g}\cdot(\text{L}\cdot\text{月})^{-1}$ ,并可能于5~6月形成藻类水华.淀山湖夏季以蓝藻为主的浮游藻类群落的增长速度在6月中下旬(始盛点,N1)开始迅速增加,7月中旬浮游藻类密度已经达到始盛点的2倍,浮游藻类密度的翻倍时间仅为26 d.到7月下旬浮游藻类群落的增长速度达到最大值 $22.8\mu\text{g}\cdot(\text{L}\cdot\text{月})^{-1}$ ,并可能于8~9月形成蓝藻水华.

(3) 累积频率分析表明,春季淀山湖水体 Chla 浓度大于始盛点(N1)藻类密度  $15.7 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  的发生频率为 75.2%,大于春季最大藻类增长速度时的藻类密度  $36.2 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  (N2) 的发生频率为 46.2%。夏季水体 Chla 浓度大于始盛点(N1)的藻类密度  $16.7 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  的发生频率为 71.9%,大于夏季最大藻类增长速度的藻类密度  $38.7 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  (N2) 发生频率为 20.6%。

(4) 淀山湖浮游藻类的早期增长是可以预计的。实际上,淀山湖浮游藻类增长的过程给了早期预防和控制实施的时间和浓度范围,只要抓住 N1 ~ N2 的时机,就有可能控制浮游藻类的过度增长。

#### 参考文献:

- [1] Hudnell H K. Within water-body management: a needed but neglected complement to watershed management [J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2010, **12**(3):205-207.
- [2] Bresnan E, Fernand L, Davidson K, *et al.* MCCIP ARC science review 2010-11: Climate change impacts on harmful algal blooms (HABs) [R]. UK: Marine Climate Change Impacts Partnership (MCCIP), 2011. 10-11.
- [3] 黄佳聪,吴晓东,高俊峰,等. 蓝藻水华预报模型及基于遗传算法的参数优化[J]. *生态学报*, 2010, **30**(4):1003-1010.
- [4] 杜聪,王世新,周艺,等. 应用遥感数据评价蓝藻水华对太湖取水口的影响[J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(10):1041-1046.
- [5] 张红,黄勇. 基于 NOAA/AVHRR 卫星资料的巢湖水华规律分析[J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(7):727-732.
- [6] 湛敏,吴锐,雷惊雷,等. 基于复杂网络同步特征的水华暴发数值模型[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(10):2224-2230.
- [7] 刘信安,封丽,Charles Q J. 三峡库区水华优势藻类生长动力学的普适性研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(8):2145-2148.
- [8] 刘信安,张密芳. 三峡库区优势藻类聚集参数与水华状态函数[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(9):1916-1922.
- [9] 刘信安,湛敏,马艳娥. 三峡库区流域藻类生长与营养盐吸收关系[J]. *环境科学*, 2005, **26**(4):95-99.
- [10] 孔繁翔,马荣华,高俊峰,等. 太湖蓝藻水华的预防、预测和预警的理论与实践[J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(3):314-328.
- [11] 马荣华,孔繁翔,段洪涛,等. 基于卫星遥感的太湖蓝藻水华时空分布规律认识[J]. *湖泊科学*, 2008, **20**(6):687-694.
- [12] World Health Organization (WHO). Toxic cyanobacteria in water: a guide to public health significance, monitoring and management [M]. London: E & FN Spon, an imprint of Routledge, 1999. 183-210.
- [13] National Health and Medical Research Council (NHMRC). Guidelines for managing risks in recreational waters [R]. Canberra: NHMRC, 2005. 24-117.
- [14] Health Canada. Guidelines for Canadian drinking water quality [R]. Canada: Health Canada, 1993. 3-15.
- [15] Pilotto L S, Douglas R M, Burch M D. Health effects of exposure to cyanobacteria (blue green algae) during recreational water activities [J]. *Australian and New Zealand Journal of Public Health*, 1997, **21**(6):562-566.
- [16] World Health Organization (WHO). Monitoring bathing waters: A practical guide to the design and implementation of assessments and monitoring programmes [M]. London: E & FN Spon, an imprint of Routledge, 2000. 106-157.
- [17] 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.
- [18] 马知恩. 种群生态学的数学建模与研究[M]. 合肥:安徽教育出版社, 1996. 11-18.
- [19] 阎海,雷志芳,叶常明. 斜生栅藻降解邻苯二甲酸二甲酯和苯胺的动力学研究[J]. *环境科学学报*, 1998, **18**(2):216-220.
- [20] 陈德辉,刘永定,袁峻峰,等. 微囊藻和栅藻共培养实验及其竞争参数的计算[J]. *生态学报*, 1999, **19**(6):908-913.
- [21] 王修林,张蕾,韩秀荣,等. 营养盐对海洋浮游植物生长的影响——数学模型研究[J]. *海洋科学进展*, 2002, **20**(3):96-101.
- [22] 王修林,邓宁宁,祝陈坚,等. 磷酸盐、硝酸盐组成对海洋赤潮藻生长的影响[J]. *中国海洋大学学报*, 2004, **34**(3):453-460.
- [23] 杨苏文,姜霞,金相灿.  $\text{HCO}_3^-$  对铜绿微囊藻、四尾栅藻和小环藻增长特性及竞争行为的影响[J]. *生态环境*, 2007, **16**(2):347-351.
- [24] 郑忠明,白培峰,陆开宏,等. 铜绿微囊藻和四尾栅藻在不同温度下的生长特性及竞争参数计算[J]. *水生生物学报*, 2008, **32**(5):720-728.
- [25] 王爱军,王修林,王江涛,等. 光照对东海赤潮高发区春季硅藻生长的影响[J]. *中国海洋大学学报*, 2006, **36**:173-178.
- [26] 王长友,王修林,孙百晔,等. 铜对中华鳊条藻生态毒性效应的现场实验[J]. *中国环境科学*, 2007, **7**(5):703-706.
- [27] 王丽卿,张军毅,王旭晨,等. 淀山湖水体叶绿素 a 与水质因子的多元分析[J]. *上海水产大学学报*, 2008, **1**(17):58-64.
- [28] 上海市环境保护局. 上海市环境质量报告书(2004-2009) [R]. 上海:2005-2010.
- [29] 宋永昌. 淀山湖富营养化及其防治研究[M]. 上海:华东师范大学出版社, 1992. 72-82.
- [30] Goldman C R, Horne A J. Limnology [M]. New York: McGraw-Hill Book Co., 1983. 226-228.
- [31] Hoogenhout H, Ames J. Growth rates of photosynthetic microorganisms in laboratory cultures [J]. *Archives of Microbiology*, 1965, **50**(1):10-15.
- [32] Reynolds C S. Cyanobacterial water-blooms [A]. In: Callow J A. Advances in botanical research [C]. London: Academic Press, 1987. 17-143.
- [33] 万能,宋立荣,王若南,等. 滇池藻类生物量时空分布及影响因素[J]. *水生生态学报*, 2008, **32**(2):184-188.
- [34] 许秋瑾,高光,陈伟民. 太湖微囊藻毒素年变化及其与浮游藻类的关系[J]. *中国环境科学*, 2005, **25**(1):28-31.
- [35] 姜霞,王书航,钟立香,等. 巢湖藻类生物量季节性变化特征[J]. *环境科学*, 2010, **31**(9):2056-2062.
- [36] 李慧敏,杜桂森,姜树君,等. 官厅水库的微囊藻毒素及其水

- 环境的相关性[J]. 生态学报, 2010, **30**(5):1322-1327.
- [37] 李小平. 蓝藻运动与水华早期预防和控制[J]. 自然杂志, 2008, **30**(5):280-286.
- [38] Burge K, Breen P F. Detention time design criteria to reduce the risk of excessive algal growth in constructed water bodies [A]. In: Delectic A, Fletcher T. Book of proceedings of 7th international conference on urban drainage modeling and the 4th international conference on water sensitive urban design [C]. Clayton: Monash University, 2006. 841-848.
- [39] Bartram J, Rees G. Monitoring bathing waters: A practical guide to the design and implementation of assessments and monitoring programs [M]. New York: Taylor & Francis, 2000. 205-258.