

· 环境预警 ·

doi:10.3969/j.issn.1674-6732.2011.02.001

# 富营养化与温度因素对太湖藻类生长的影响研究

申哲民<sup>1</sup>, 张涛<sup>2</sup>, 马晶<sup>1</sup>, 叶春<sup>3</sup>

(1. 上海交通大学环境科学与工程学院, 上海 200240; 2. 江苏省环境监测中心, 江苏 南京 210036; 3. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

**摘要:**为了研究气候变暖和富营养化对湖泊水生态系统的影响,应用阿列纽斯方程修正的 Monod 生长模型定量研究长期以来太湖藻类生物量与营养元素和温度的关系。研究表明,在近年来的富营养化状况下,年均气温每增加 1.0 °C, 年均藻类生物量增加 0.145 倍。湖泊富营养化越严重,年平均气温对藻类生长的影响就越大,由此可以定量评估和预测年均气温升高和水体富营养化对水生态系统的影响。

**关键词:**湖泊;富营养化;水华;全球变暖

中图分类号:X172

文献标识码:A

文章编号:1674-6732(2011)-02-0001-04

## Study of Effects of Eutrophication and Temperature on Algal Growth in Taihu Lake

SHEN Zhe-min<sup>1</sup>, ZHANG Tao<sup>2</sup>, MA Jing<sup>1</sup>, YE Chun<sup>3</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Jiangsu Provincial Environmental Monitoring Center, Nanjing, Jiangsu 210036, China; 3. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

**ABSTRACT:** To know how global warming and eutrophication affect water ecosystems, the long relation of algal biomass in Taihu Lake with both nutrients and temperature has been studied quantitatively by Mode multiplicative growth model modified by incorporating Arrhenius equation. The fitted results suggest that annual mean algal biomass increases by 0.145 times when annual mean AT increases by 1.0 °C. The more eutrophic the lakes are, the more effects on the algal growth AT has. Subsequently, the long-term joint effect of annual temperature increase and eutrophication on the water ecosystems can be quantitatively assessed and predicted.

**KEY WORDS:** lake; eutrophication; algal bloom; global warming

### 0 引言

温室效应引起的全球变暖问题已经成为全球性的环境问题,气候变暖对水体生态体系的影响也日益明显。近年来,随着社会经济的发展,越来越多的河口、海洋和淡水水体面临富营养化的威胁。富营养化是指在人类活动的影响下,生物所需的 N、P 等营养物质大量进入湖泊等缓流水体,引起藻类及其他浮游生物迅速繁殖,水体透明度和溶解氧含量下降,水质恶化,鱼类及其他生物大量死亡,水体生态系统和功能受到破坏的现象。全球变暖和富营养化对水体生态系统的协同作用日益受到关注。

JORGENSEN 指出,浮游藻类的生长是富营

营养化的关键,着重研究了 N、P 负荷与浮游藻类生产力的相互作用和关系,揭示了湖泊富营养化形成机理。湖库浮游藻类的生长是由营养盐、水文气象条件等因素控制的<sup>[1]</sup>。N、P 是藻类增长的限制因子,叶绿素 a 的含量与一定范围内的总氮(TN)、总磷(TP)的浓度呈正相关关系,湖库富营养化引起藻类爆发,与营养物质、水文、气象、气候条件都有一定的关系。随着 TN、TP 浓度的升

收稿日期:2010-07-23;修订日期:2010-08-18

基金项目:国家“十一五”水体污染控制与治理科技重大专项项目(2009ZX07101-015)。

作者简介:申哲民(1970—),男,副教授,博士。从事环境化学、污染控制原理与技术方面的研究。

高,营养物质越发丰富,促进了藻类生长;这时,升高的温度也会使藻类生长加速。笔者采用TN、TP和浮游植物的叶绿素a的年际变化及气温、水温的年均数据,研究年均气温升高和水体营养盐浓度对湖泊水生态系统的影响。

## 1 太湖湖泊形态和数据分析模型

### 1.1 太湖湖泊形态

中国江苏省南部的太湖为大型浅水碟形湖泊,它是由内陆断陷基础上的海湾逐步发育而成的一个浅水泻湖型湖泊,是中国第三大淡水湖,也是富营养化比较严重的湖泊。湖盆特点为浅水平底,湖泊面积2428 km<sup>2</sup>,长68.5 km,平均宽34 km,长宽比为2,岸线长405 km,平均水深1.89 m,最大水深2.60 m,湖泊容积44.3亿m<sup>3</sup>,年平均吞吐水量约52亿m<sup>3</sup>,年交换系数1.17。1980年后,由于富营养化的影响,太湖中的微囊藻引起了蓝绿藻爆发,致使太湖水质越来越差。死亡藻类产生藻毒素,包括细胞毒素和生物毒素。这些毒素会引起野生、家养动物以及人类慢性、亚慢性或急性中毒。2007年太湖蓝藻爆发引发的饮用水危机,再次警示人们湖、库富营养化问题的严重性与紧迫性。定量化研究自然水体的温度和营养物质对浮游植物生长的协同作用是很有必要的<sup>[4]</sup>。

### 1.2 富营养化模型

太湖中TN、TP和叶绿素a的浓度在空间和时间上有明显的相关性。利用莫诺特模型可以分析营养物质对藻类生长速率的影响。GOLDMAN和CARPENTER将阿列纽斯方程引入莫诺特模型中,通过温度和营养物质的公式,得出了乘法生长模型来分析藻类生长速率<sup>[2]</sup>,见式(1)。

$$\mu = \frac{A \cdot b^T \cdot S}{K + S} \quad (1)$$

式中: $\mu$ ——浮游植物生长速率,d<sup>-1</sup>;A——一定温度下浮游植物最大生长速率,d<sup>-1</sup>;b——活化能常数;S——限制营养物质(N或P)的质量浓度,mg/L或mg/m<sup>3</sup>;K——半饱和常数,mg/L;T——温度,℃。

因为每个微胞藻属细胞包含 $3.4 \times 10^{-13}$ g叶绿素a,因此可用叶绿素a来表示浮游植物生物量。RIER和STEVENSON利用莫诺特模型找出藻类生物量与N、P浓度的关系<sup>[3]</sup>,见式(2)。

$$PB = \frac{PB_{\max} \cdot S}{K + S} \quad (2)$$

式中:PB——叶绿素a的质量浓度, $\mu\text{g/L}$ ;PB<sub>max</sub>——叶绿素a的最大质量浓度, $\mu\text{g/L}$ ;S——限制营养物质(N或P)的质量浓度,mg/L或mg/m<sup>3</sup>;K——半饱和常数,mg/L。

然而,目前还没有简单的模型可以描述在自然水体中,年际温度与营养物质浓度长期共同作用对藻类生物量的影响。将乘法生长模型应用到太湖,利用长期数据研究藻类生物量与营养物质和温度的关系。评估和预测升高的年际温度对水体的富营养化的影响。

### 1.3 数据分析模型

笔者采用1980—2008年TN、TP、气温和水温的年平均数据进行研究。

根据公式(1)和(2),将温度对藻类生物量的影响也引入到莫诺特模型,见式(3)。

$$[Chla] = \frac{a \cdot b^T \cdot S}{K + S} \quad (3)$$

式中:a——叶绿素a的质量浓度, $\mu\text{g/L}$ ;b——活化能常数;S——限制营养物质(N或P)的质量浓度,mg/L或mg/m<sup>3</sup>;K——半饱和常数,mg/L;T——温度,℃。

在一个含有参数a、b和K的公式中,确定温度与营养元素的相关系数有一定难度。引入两个线性回归方程计算参数,见式(4)和(5)。

$$\frac{1}{[Chla]} = \frac{K}{a \cdot b^T} \cdot \frac{1}{S} + \frac{1}{a \cdot b^T} \quad (4)$$

$$\ln \frac{[Chla]}{(a \cdot S)/(K + S)} = T \ln b \quad (5)$$

采用插值法计算这两个公式。首先,由莫诺特模型可知,b是一个固定值,如初始值定为1.066 $[\mu = 0.851(1.066)T]$ 。其次,a和K可通过公式(4)计算。最后,将K和b代入公式(5),通过线性回归方程得到一个新的b(b')。如果b'≠b,就用b'代替b重新开始计算。直到b'=b时,a、b和K的值才能确定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 历史数据

1980—2008年的年均TN、TP和浮游生物量的数据如图1所示。

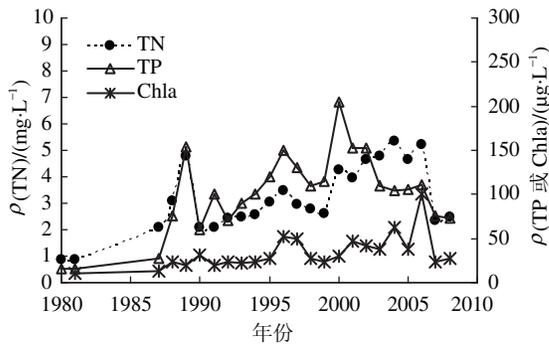


图 1 太湖 TN、TP、Chla 的常年数据

由图 1 可知,1990 年后,太湖的年均 TN、TP 质量浓度一般都达到 3.0 mg/L 和 100 μg/L,2004 年,年均 TN 质量浓度最高,为 5.34 mg/L;2000 年,年均 TP 质量浓度最高,为 100 μg/L。随着人口增加,生活水平的提高,及当地农业与工业的发展,水体污染日益严重。TN、TP 浓度的升高会促进藻类的生长,富营养化现象也会不断出现。20 世纪 90 年代,富营养化现象几乎每年都会发生,水体污染现象已经成为太湖周边主要的环境问题。2003 年以后,太湖的 TN、TP 浓度略有下降,然而,藻类爆发频率却呈上升趋势。2007 年 5 月,富营养化现象严重影响了无锡市的淡水供应。

1990 年以后,叶绿素 a 浓度总体呈上升趋势。2006 年,叶绿素 a 的年均质量浓度达到最高值,大于 100 μg/L。然而,其浓度变化没有规律性。藻类生长情况很复杂,受环境中很多因素的影响,如温度、光照、营养元素等。藻类的变化与气温、水温、TN 和 TP 这些因素变化不一致。太湖中 TN、TP 和浮游植物中叶绿素 a 的年际变化显示,浮游植物的生物量每年夏天都会出现峰值。夏季和冬季之间,浮游植物物种的组成会发生明显的变化。风速和风向影响了浮游植物的水平分布,尤其是湖中的微囊藻。浮游植物生物量变化主要是由温度、风和浊度控制的,长期生物量的动态变化也受营养物浓度的影响。然而,准确描述藻类生长是水质模型中最难的课题之一。

太湖 1980—2008 年的年均气温和水温如图 2 所示。

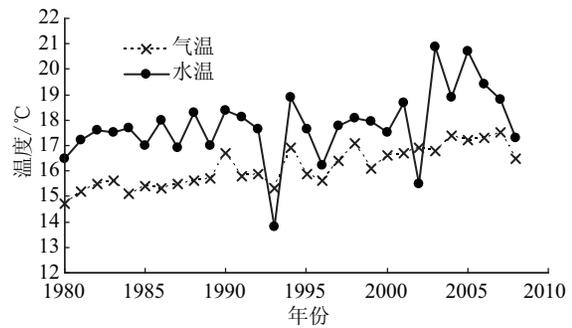


图 2 太湖常年气温、水温变化

从图 2 中可知:1980—2008 年,太湖的年均气温每 10 a 上升 0.800 °C ( $R = 0.8604, n = 29, P < 0.0001$ ),比全球陆地变暖速度还要高,与 BOHANNON 发现的内蒙古变暖速度(为全球变暖速度的 2 倍)很接近。其中年均温度最高为 2007 年的 17.5 °C。由此可见,太湖是研究全球变暖对水质影响的适合例子。

1980—2008 年,太湖年均水温的波动很大。年均水温每 10 a 增加 0.626 °C ( $R = 0.3834, n = 29, P = 0.0401$ )。随着太湖年均气温增加 1.0 °C,其年均水温增加 0.78 °C。这与前面的结论很相似,随着气温每升高 1.0 °C,平均水表面温度升高 0.8~1.0 °C。2003 年,年均水温达到最高值 20.9 °C。水温与气温之间有很显著的相关性 ( $R = 0.61, n = 29$ )。但是,由于水温会受到湖面上运输船舶、水流量以及其他人为因素的干扰,水温偏差大于气温。

### 2.2 生长影响模型

上述实验证实了 TN 和 TP 是影响浮游植物群落的结构和功能两个重要因素。光合作用主要在水表面进行,浮游植物群落也会受气温和水温的影响,其与叶绿素 a 的相关系数如表 1 所示。

表 1 各影响因素与叶绿素 a 的相关系数

	气温	水温	TN	TP
相关系数	0.568	0.321	0.693	0.413

由表 1 可看出,叶绿素 a 与气温和 TN 相关性较显著。采用插值法拟合公式(3)的最优结果,拟合结果如图 3 所示。

拟合的叶绿素 a 与气温和 TN 的莫诺特修正模型如公式(8)所示:

$$[Chla] = \frac{6.341 \times (1.145)^{AT} \times TN}{3.095 + TN} \quad (8)$$

式中:  $AT$ ——气温,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $TN$ ——总氮的质量浓度,  $\text{mg/L}$ 。

$TN$  和  $AT$  是限制藻类生长的两个关键因素。由于光合作用在近水面进行, 因此  $AT$  对藻类影响很大。结果表明, 年均气温每增加  $1.0^{\circ}\text{C}$ , 年均藻类生物量会增加  $0.145$  倍。水体富营养化程度越显著, 温度升高对藻类生长的影响越大。

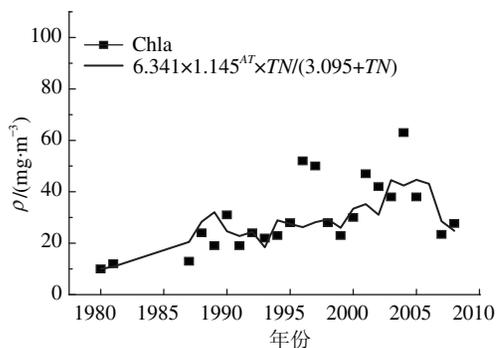


图3 年均叶绿素 a 与  $AT$  和  $TN$  拟合结果

从历史数据中可看出,  $m(TN):m(TP) = 35/1$ , 大于  $25/1$ , 这时,  $P$  是最小限制因子。然而, 比起  $TP$ , 藻类生长与  $TN$  相关性更大<sup>[7]</sup>。主要有以下原因: 细胞中的  $N$  会由于异养分解有机  $N$  而以氨的形式大量释放进入水体; 藻类吸收的磷酸盐多以聚体形式存在; 藻类细胞代谢会释放营养物质, 其释放  $N$  的速度比  $P$  快; 藻类生长所需要的  $N$  更多。因此用莫诺特模型计算时,  $TN$  是最好的预测藻类爆发的因子<sup>[8,9]</sup>。

当营养物质不足时, 藻类细胞组织可通过储存营养物质来维持自身生长并与其他初级生产者竞争。藻类可以从水体中吸收  $73\% \sim 98\%$  的  $N$  和  $79\% \sim 88\%$  的  $P$ 。当在爆发期时, 藻类从水中吸收营养物质; 反之, 藻类分解时释放营养物质进入水体中。藻类会增加沉积  $N$ 、 $P$  的循环通量, 在水中保留大量的营养物质, 这样就导致富营养化的反馈和刺激藻类生长, 气候变暖会加速这种不利现象的反馈。

### 3 结论

利用改进的生长模型研究了温度与营养盐浓

度对藻类生长的长期共同影响, 结果表明,  $TN$  和气温是影响藻类生长的两个关键因素。气温对藻类的生长影响大, 因为藻类的光合作用是在近水面进行的。藻类可以获得水中  $73\% \sim 98\%$  的  $N$  和  $79\% \sim 88\%$  的  $P$ 。同时, 死亡的藻细胞沉积在水体, 分解释放营养物质。营养物质随着藻类  $N$ 、 $P$  循环而累积, 这样水中的营养物质会增加。水体富营养化积极反馈这些结果, 促使藻类生长, 同时全球气候变暖也加剧了这种现象。浮游植物  $N$  的大量释放和湖泊沉积物内部  $P$  的负荷可以解释  $TN$  是藻类生长峰值的最好预测因子。湖泊富营养化越严重, 气温对藻类生长的影响就越大。

### [参考文献]

- [1] JORGENSEN S E. Application of ecology in environmental management [M]. Boca Raton: CRC Press, 1983.
- [2] GOLDMAN J C, CARPENTER E J. A kinetic approach to the effect of temperature on algal growth[J]. Limnology and Oceanography, 1974, 19 (5): 756 - 766.
- [3] RIER S T, STEVENSON R J. Response of periphytic algae to gradients in nitrogen and phosphorus in streamside mesocosms[J]. Hydrobiologia, 2006, 561(1): 131 - 147.
- [4] 况琪军, 马沛明, 胡征宇, 等. 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, 2005, 5(2): 87 - 91.
- [5] CHEN Y W, FAN C X, TEUBNER K, et al. Changes of nutrients and phytoplankton chlorophyll-alpha in a large shallow lake, Taihu, China: an 8-year investigation[J]. Hydrobiologia, 2003, 506 (1 - 3): 273 - 279.
- [6] CHEN Y W, QIN B Q, TEUBNER K, et al. Long-term dynamics of phytoplankton assemblages: Microcystis-domination in Lake Taihu, a large shallow lake in China[J]. Journal of Plankton Research, 2003, 25 (4): 445 - 453.
- [7] 王淑芳. 水体富营养化及其防治[J]. 环境科学与管理, 2005, 30(6): 63 - 65.
- [8] 涂建峰, 郑丰, 穆宏强. 湖泊富营养化的产生机制及主要影响[J]. 水利水电快报, 2007, 28(11): 1 - 4.