

67-74

# 太湖水华成因及控制途径初探

杨清心

X 524

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

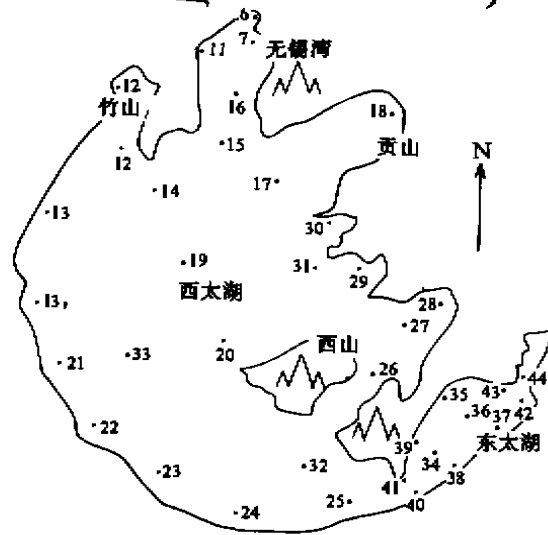
A

**提要** 1990年8~12月对太湖水华9次调查表明,水华主要由漂浮性蓝藻-微囊藻组成,夏季SE风时其漂移集聚是西北湖区形成严重水华的主要原因。这种漂移使得藻类所含营养物质吞吐流方向传输,形成了一种“生物营养过滤器”,加速了太湖尤其是西北湖区的富营养化进程。太湖外源N、P负荷量分别为12.0和0.85g/(m<sup>2</sup>·a),足以引起富营养化;表层5cm底泥中含丰富的N、P,其释放也成为湖水中部分营养的来源。因2~8月藻类总生物量的增长基本遵守 Logistic 方程  $dN/dt = N \cdot r(1 - N/K)$ ,故对藻类控制可从N、r入手,即通过收获藻类达到控制藻类总量和营养输出的双重功效;提高水位增加非光合层厚度,有效地降低水柱中藻类生产力;建立有水生植被的水质保护区也是一种局部藻类控制方法。

**关键词** 太湖, 水华, 微囊藻, 风集作用, 水华控制

污染, 湖泊

太湖位于长江三角洲南部,面积2338km<sup>2</sup>,平均水深1.9m,属大型浅水湖泊。自60年代以来,入湖污染量不断增加,富营养化日趋严重<sup>[1~3]</sup>。1959~1988年曾先后数次对此湖进行过研究<sup>[1~10]</sup>,但对水华的研究不多,原因在于尽管水华已有数十年历史,但自1990年以来的水华爆发才达到了影响供水和湖泊生态环境的程度。本文依据对太湖水华的专项调查研究结果对其基本特征、成因及可能控制途径进行初步探讨。



## 1 调查研究方法

全湖布设41个样点(图1),分别在1990年8、10、12月中旬和1991年2、4、6、8、10、12月中旬对各样点的水

图1 太湖形态及采样点布设简图  
Fig. 1 Morphology of Taihu Lake and the sampling points

• 水利部太湖流域管理局资助项目。

来稿日期:1993-12-29;接受日期:1994-05-17。

作者简介:杨清心,女,1954年生,助理研究员。1985年兰州大学生物系硕士生毕业,主要从事湖泊水生植物及富营养化生物控制研究工作。发表“伊乐藻在东湖的引种”等学术论文10余篇。

质、表层底质和浮游生物进行采样和分析,同时对一些水文和气象因子及湖水物理特征进行测定,并对水华的分布情况进行调查及制图,计算全湖平均值时考虑每个样点所代表的面积和水深。

## 2 水华的基本特征

水华是在一定的营养、气候、水文条件和生物环境下形成的藻类过度繁殖和聚集现象<sup>[11,12]</sup>,因而在优势种类组成、发生时间及水平分布(图2)上具有一定的规律性。

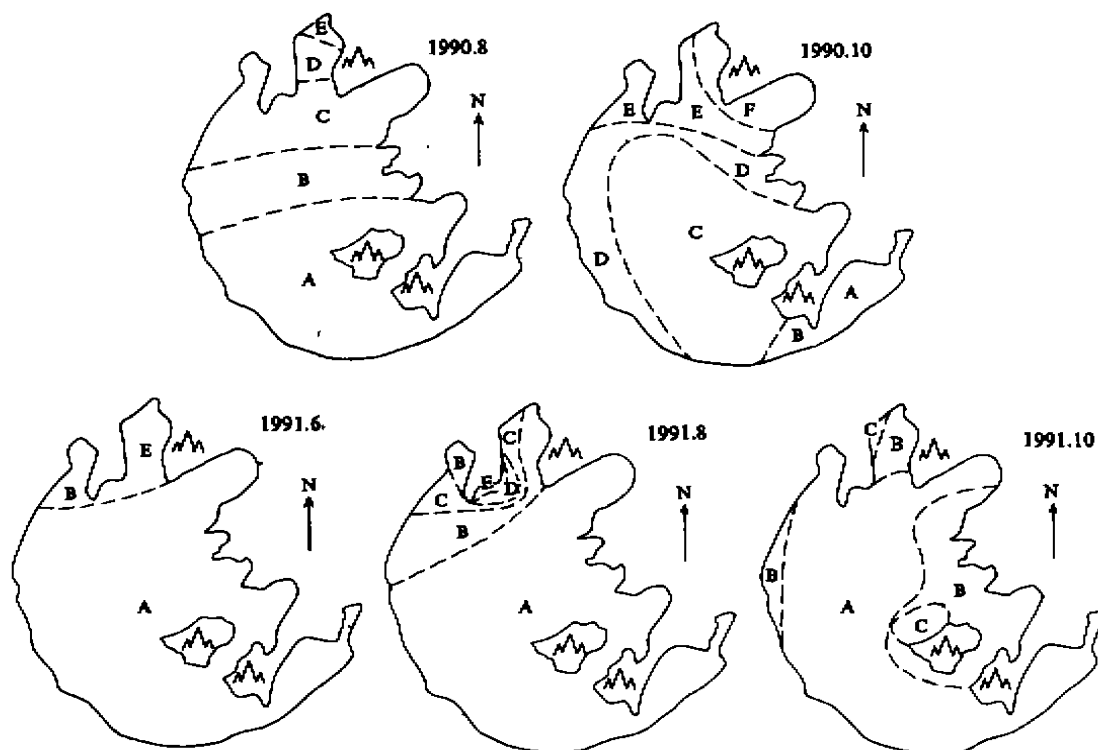


图2 1990年8、10月和1991年6、8、10月太湖水华分布状况

A: 无蓝藻颗粒区; B: 蓝藻颗粒悬浮区; C: 蓝藻颗粒漂浮区;  
D: 蓝藻带状聚集区; E: 蓝藻片状聚集区; F: 蓝藻高度聚集区

Fig. 2 Distribution of algal bloom of Taihu Lake in 1990 (Aug., Oct.) and 1991 (Jun., Aug., Oct.)

### 2.1 优势种类

水华最为严重的1990年8月、10月在西北湖区,蓝藻中的微囊藻(*Microcystis*)占总生物量的69.8%,铜绿微囊藻和水华微囊藻(*M. aeruginosa* Kutz., *M. flos-aquae* Kirch.)为优势种,是形成水华的主体;螺旋鱼腥藻、水华鱼腥藻(*Anabeana spiroides* Kleb., *A. flos-aquae* Breb)和湖沼色球藻(*Chroococcus limneticus* Lemm)为亚优势种类,占总生物量的9.6%和5.8%,也是构成水华的成份;硅藻门中以小环藻(*Cyclotella* spp.)为主,占总生物量的5.2%。

## 2.2 发生时间

太湖地处亚热带北沿,气候四季分明,2~4月中旬水温低于15℃,藻类增长缓慢;4月中旬至6月中旬水温15~25℃,藻类开始迅速增长;到了6月中旬时已在西北部形成水华;此后水温高于25℃,藻类进入盛长期,在西北部形成严重水华。

## 2.3 水平分布

两年中水华水平分布如图2示。1990年8月全湖藻类总量23670t,水华分布呈南轻北重,以无锡湾较为严重;10月藻类增至42074t,水华遍及整个西太湖,同时存在因Angmuir环流形成的藻类漂浮带<sup>[11]</sup>,在无锡湾近岸形成厚达数十厘米的藻类堆积层。

1991年6月全湖藻类总量22772t,在近岸处形成狭窄的藻类聚集带。8月藻类增至42552t,在无锡湾马山沿岸形成藻类聚集层,15号点藻类生物量超过600mg/L,10月藻类虽仍有42074t但由于全湖分布较为均匀,漂浮于水面的藻类较少。

## 3 水华成因探讨

水华的形成需要充足的营养和优越的物理条件,还直接或间接地受湖内有关生物的影响,这里仅对太湖中的氮、磷营养状况及风和风浪在水华形成中的作用加以讨论。

### 3.1 氮、磷营养状况

微囊藻无固氮能力<sup>[6]</sup>,大量营养元素氮和磷的供给在水华形成中起着关键作用。能为藻类直接吸收利用的湖水中溶解的 $\text{NO}_3^-$ -N,  $\text{NH}_4^+$ -N和 $\text{PO}_4^{3-}$ -P的水平直接反映了藻类的营养供给状况。

**3.1.1 无机氮、磷供给** 太湖水中 $\text{NO}_3^-$ -N,  $\text{NH}_4^+$ -N(以下简称无机氮)的全湖历次平均含量为0.6mg/L,九次调查中的变化过程如图3示,显见湖水中无机氮含量的这种周期性变化与水华形成过程中藻类对其吸收消耗密切相关。水华盛期无机氮量下降说明其补充速度小于藻类对它的吸收速度。

水中 $\text{PO}_4^{3-}$ -P全湖历次平均含量10 $\mu\text{g}/\text{L}$ 。1991年2~6月其含量持续上升(图4),高达20 $\mu\text{g}/\text{L}$ ;6~8月迅速下降至5~7 $\mu\text{g}/\text{L}$ ,1990年8月同样在西北部出现了较低含量,这与无机氮变化方式很相似。

1990年8月西太湖湖水中无机氮平均含量0.4mg/L, $\text{PO}_4^{3-}$ -P为4 $\mu\text{g}/\text{L}$ ,二者之比是100:1。在藻类密集的15和17点湖水中含无机氮0.094mg/L,含 $\text{PO}_4^{3-}$ -P4 $\mu\text{g}/\text{L}$ ,二者之比为23.5:1。一般认为,微囊藻对氮、磷的需求比例为9:1<sup>[12]</sup>,似乎可以认为磷是藻类生长的限制因素。但在上述两点上,由于藻类的强烈吸收,使得湖水中无机氮含量仅为西太湖平均的1/4,但 $\text{PO}_4^{3-}$ -P仍保持在4~5 $\mu\text{g}/\text{L}$ 水平,表明这一低含量的磷并未阻止藻类对氮的同化。这可能归因于藻类对低含量磷的利用能力和低含量时湖水中磷的较强补给能力<sup>[13]</sup>。

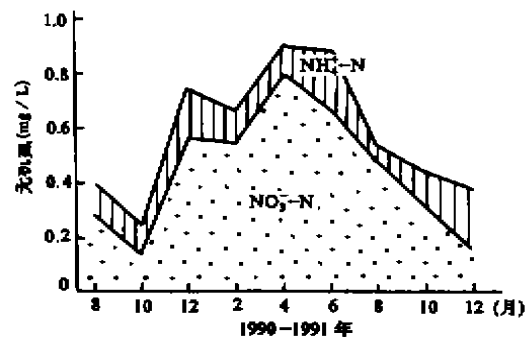
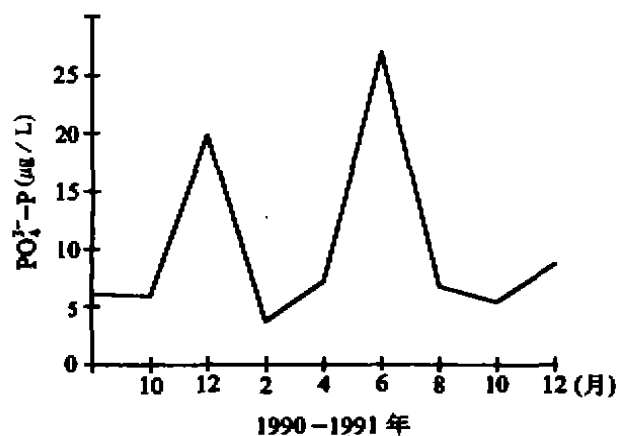


图3 西太湖水中 $\text{NO}_3^-$ -N,  $\text{NH}_4^+$ -N含量变化过程

Fig. 3 The changes of  $\text{NO}_3^-$ -N,  $\text{NH}_4^+$ -N level in West Taihu Lake

图 4 西太湖湖水中 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 含量的变化过程Fig. 4 Changes of PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P level in West Taihu Lake

### 3.2 风及风浪在水华形成中的作用

太湖中吞吐流较小,风是湖水运动的主要动力,也是影响水华的主要物理因素之一。

**3.2.1 风集作用** 调查期间在 370 点次测定中无风的频率仅为 5%,平均风速 2~4m/s。冬春季东南风和西北风几乎等几率出现,夏季以偏南风、东南风、偏东风为主,秋季风向多变。

风生层流是太湖水运动的主要形式之一<sup>[9]</sup>。1991 年 4 月藻类呈随机分布,6 月中旬在东南风作用下表层湖水向西北方向流动,当风速小于 3.5m/s 时微囊藻等漂浮性藻类主要分布在表水层,因而随着表层流向西北部漂移,在那里形成明显水华。到 8 月中旬时这种漂移聚集达到了高峰,甚至引起了东南部藻类的明显下降,而在西北部形成了严重水华。

在水华发生期漂浮性藻类的风集作用加剧了西北部的富营养化,对社会生活和湖泊生态环境构成了严重威胁。据 1990 年 8 月资料,湖水中 Chl.a 含量与以下几个水质因子有线性关系<sup>[14]</sup>。

$$\text{TN}(\text{mg/L}) = 1.152 + 0.0125\text{Chl.a}(\mu\text{g/L}) \quad F = 18.5$$

$$\text{TP}(\text{mg/L}) = 21 + 0.51\text{Chl.a}(\mu\text{g/L}) \quad F = 14.1$$

$$\text{BOD}(\text{mg O}_2/\text{L}) = 1.28 + 0.0786\text{Chl.a}(\mu\text{g/L}) \quad F = 308.6$$

$$\text{COD}(\text{mg O}_2/\text{L}) = 4.53 + 0.101\text{Chl.a}(\mu\text{g/L}) \quad F = 19.5$$

$$F_{0.01}(1,39) = 7.33$$

表明以上线性关系极为显著。从生物化学角度看,氮、磷是藻体内的大量营养元素,其呼吸代谢是构成 BOD 的重要部分;其有机体及死亡残体又是 COD 的主要组分。因此藻类的生长和聚集在一定程度上增加了西北部湖水中 TN,TP,BOD 和 COD 的含量,因而加速了其富营养化进程。在东南部,则因漂浮性藻类不断被风吹走而降低了湖水中这些营养物的含量,起到了净化水质和防止富营养化的作用。

从全湖营养平衡角度看,藻类对湖水中无机氮、磷的同化及向西北方的漂移加速了太湖的富营养化,原因在于:太湖的出水河流集中在东南部,藻类将东南部湖水中的溶解态氮、磷

同化为自身的颗粒态氮、磷并向背离出水口的方向漂移,使得这些营养物不能随水流输出,形成一种特异的“生物营养过滤器”功能,导致营养物在湖内的积累。

3.2.2 风浪 一定强度的风浪搅动可以有效地抑制藻类的增长和聚集<sup>[5]</sup>,有削弱藻类水华的功效,尤其在象太湖这样的大型浅水湖泊更是这样。风浪搅动可使漂浮性藻类的垂向分布趋于均一,在风生层流的作用下藻类沿浓度梯度发生扩散,使得藻类水平分布也趋于均一,因而破坏原已形成的聚集分布。当微囊藻被胶体沉降物裹挟时便丧失浮力而沉降<sup>[12]</sup>。太湖风浪易引起表层沉积物的再悬浮,这些悬浮物在沉降中对藻类有卷带和掩埋作用,尤其在藻类密度较高时效果更为明显。风浪引起的水质浑浊可降低湖水的透明度,从而通过减弱水下光强来限制藻类生长。

## 4 水华控制途径探讨

在此,主要探讨通过对太湖生态系统内部的调控来抑制水华的可能性。

### 4.1 藻类群体的增长模型

1991年2~8月水华形成期全湖藻类总量  $N$  的增长过程基本遵从 Logistic 方程:

$$dN/dT = N \cdot r \cdot (1 - N/K)$$

其中,  $dN/dT$  为群体增长速率 ( $t/d$ ),  $r=0.0215$  为无密度制约条件下藻类群体的增长率 ( $/d$ ),  $K=60000t$  为环境负载量。利用此方程模拟结果与实际情况非常接近(图5)。控制藻类总量的增长可从两个方面入手,一是通过消灭或收获藻类减少现存量  $N$ ,二是通过对某些环境因素的调控来降低藻类群体的增长率  $r$ 。

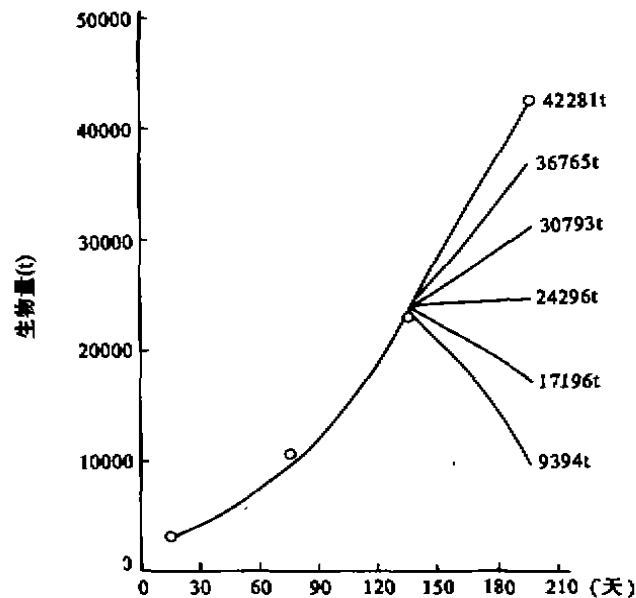


图5 1991年2~8月太湖藻类群体的增长过程(·)、模拟曲线

$dN/dT = N \cdot 0.0215(1 - N/60000)$  以及实行  $N$  控制效果预测

Fig. 5 Growing model of the algae community in Taihu Lake from Feb. to Aug., 1991.

$dN/dt = N \cdot 0.0215(1 - N/60000)$  and its possible control of algae removal

#### 4.2 现存量 $N$ 的控制

如果自 6 月 15 日西北部有明显藻类聚集时起对太湖藻类  $N$  实行控制,当日去除藻类量分别为 100t、200t、300t、400t、500t 时,可使 8 月 15 日时全湖藻类总量相应减少 13.0%, 27.2%, 42.5%, 59.3%, 77.8% (图 5),日去除量为 300t 时可使藻类总量基本稳定在 6 月 15 日的水平,日去除量为 500t 时可使 8 月 15 日的总量降至 4 月中旬的水平。

收获藻类是控制藻类最为直接有效的方式。6 月以后,太湖内漂浮性藻类向西北部的漂移聚集为收获利用提供了极大的便利,尤其在向风岸沿岸带藻类高度密集区段内,上层湖水中藻类含量可达 10%~15%。如果用装备有过滤装置的大型船只抽取上层湖水并滤出藻类,当抽水速度为 100t/h 时收获 100t 鲜藻需要 2~10h,如配备 5 条 100t 的船只进行收集,平均日除鲜藻 500t 是有可能的。

收获藻类同时起到营养物输出的作用,能在一定程度上消弱在藻类与湖水间形成的营养内循环,减轻因藻类死亡分解引起的湖水二次污染,降低湖水中营养物含量,起到抑制藻类再生的作用。收获所得鲜藻有多种用途,如沤制肥料<sup>[15]</sup>,新鲜蓝藻含有丰富的蛋白质和多种生化物质<sup>[11]</sup>,如能及时干燥,可作饲料添加剂或提取生化原料。

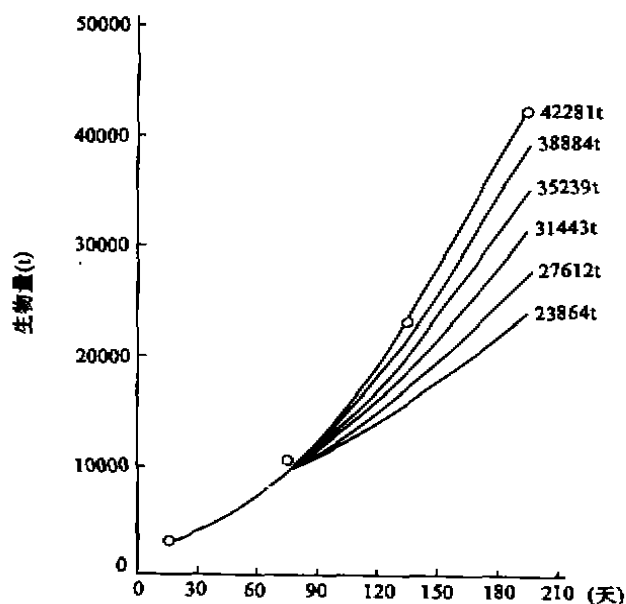


图 6 太湖藻类群体  $r$  控制效果预测

Fig. 6  $r$ -control model of the algae community of Taihu Lake

#### 4.3 增长率 $r$ 的控制

如果自 4 月 15 日始对藻类增长率  $r$  实现有效控制(图 6),当  $r$  减少 10%、20%、30%、40%,和 50%,至 8 月 15 日时,可使全湖藻类总量减少 8.0%、16.7%、25.6%、34.7%和 43.6%(图 6)。这里的增长率  $r$  包含了藻类自身的生长与死亡、被捕食或滤食等多种因素,因而可以通过对藻类生态环境的各种调节去控制  $r$  的大小。

适当提高运行水位可以通过光限制降低单位面积湖面水柱中藻类的净生产力,从而达到对  $r$  的控制。据 1991 年 8 月在西北部湖区初级生产力测定结果,在深 2.5m 的湖底层总光合强度接近于零。而 1991 年同期此处水深增加了 1m,假定其它条件均不变的情况下等于比上一年增加了 1m 的呼吸消耗层,这将会使水柱净生产力减少 46%,这也是 1991 年高水位下太湖藻类迅速减少的原因之一。

**致谢** 感谢水利部太湖流域管理局环保分局汪耀斌副局长、秦佩英处长、徐芸芳高级工程师和石建华同志对此项研究的支持和配合,感谢季江、吴庆龙、周万平、张立、隋桂荣、高光、陈源高等同志参加部分工作并提供资料。

### 参 考 文 献

- 1 顾丁锡,孙超白.二十年来太湖生态环境变化及其趋势的初步分析.中国科学院南京地理与湖泊研究所集刊,第 1 号.北京:科学出版社,1983.51~56
- 2 中国科学院南京地理研究所.太湖综合调查报告.北京:科学出版社,1965
- 3 孙顺才等.太湖.北京:海洋出版社,1993
- 4 李景钺等.太湖环境质量调查研究.上海师范学院学报(自然科学版),1983(环境保护专集):1~196
- 5 鲍建平,陈 辉.太湖的浮游动物.太湖水产增殖,1984,(1):33~38
- 6 舒金华.入太湖污水中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  稀释自净规律的实验.中国科学院南京地理与湖泊研究所集刊,第 2 号.1984,北京:科学出版社.130~144
- 7 张开翔.太湖大银鱼食性.中国科学院南京地理与湖泊研究所集刊,第 3 号.北京:科学出版社,1985.49~60
- 8 孙顺才等.太湖地形及现代沉积.中国科学院南京地理与湖泊研究所集刊,第 4 号.北京:科学出版社,1987.1~6
- 9 吴 坚,濮培民.太湖水动力学的不规则网格有限差分数值模拟.中国科学院南京地理与湖泊研究所集刊,第 6 号.北京:科学出版社,1989.1~13
- 10 陈文海,周汉书.太湖螺、蚶资源及其增殖.淡水渔业,1989,(2):24~26
- 11 Reynold C S. The ecology of freshwater phytoplankton. Cambridge studies in ecology. London: Cambridge Univ Press, 1984
- 12 Robert E L. Phycology(Second edition). London:Cambridge Univ Press, 1985
- 13 李德尚,焦念志.风力对内陆浅水水域磷水平的影响.海洋湖沼通报,1991,(1):35~39
- 14 杨清心,李文朝.太湖藻类水华盛发期水质富营养化状况的 Fuzzy 聚类分析.南京林业大学学报,1991,15:121~126
- 15 周万平,余源盛.湖旋对水稻增产效果的研究.中国科学院南京地理与湖泊研究所集刊,第 3 号.北京:科学出版社,1985.61~67

## ALGAL BLOOM IN TAIHU LAKE AND ITS CONTROL

Yang Qingxin

(*Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008*)

### Abstract

In Taihu Lake, algal bloom is caused by blue-green algal microcystis, occurring in summer and autumn, and distributing mostly in the northwestern area. This lake has nutrient loading of 12.0 g N/(m<sup>2</sup> · a) and 0.85g P/(m<sup>2</sup> · a), and a nutrient store of 62.3 g N/(m<sup>2</sup> · a) and 41.0 g P/(m<sup>2</sup> · a) in the 5 cm surface layer of sediments. Due to its shallowness and strong disturbance of wind-waves, the lake provides sufficient nutrients for the algae. In summer, the algae has a daily P/B ratio of 0.92, a net productivity equal to 20960 t/d of fresh algae, and consumes as much as 167.3 t N and 15.85t P every day. Wind-crowding effect of the buoyant algae results in heavy algal bloom in the northwestern area, and it forms a 'special biological nutrient filter' which prevents nutrients in the lake water from being brought out by the outflow currents and enhances nutrient accumulation in the lake. Strong disturbance of wind-waves can break algal bloom and limit the light availability of algae. Sharp decrease of macro-zooplankton may enhance algal bloom in the lake.

The algal community developed following Logistic Equation

$$dN/dt = N \cdot r \cdot (1 - N/K) \quad (r = 0.0215 /d, K = 60000t)$$

from Feb. to Aug. in 1991. Although it is difficult to reduce  $K$  by nutrient control in a short time, it may be possible to reduce  $N$  or  $r$  by algal removal or by regulating some ecological factors in the lake. By harvesting algae, not only can the amount of algae in the lake be effectively controlled, but also large amount of nutrients be removed. By elevating water level,  $r$  may be reduced because the net productivity may be decreased by adding a respiratory layer in the bottom. Protecting zooplankton to increase its grazing pressure on algae may be a good way to reduce  $r$ ; but it needs further studies to prove if silver carp can be used to control blue-green algae in this lake.

**Key Words** Taihu Lake, algae bloom, microcystis, wind-crowding water bloom