

53-59

太湖梅梁湾藻类生态模拟 与蓝藻水华治理对策分析

刘元波 陈伟民 范成新 季江 高锡芸 陈宇炜

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

X 824
Q 949.2208

提 要 根据目前对太湖梅梁湾生态环境的认知, 建立该湖区藻类生态动力学模型并进行生态模拟. 基于模拟结果, 对太湖富营养化中最严重的蓝藻水华治理与污染物排放控制和清淤工程进行了分析. 结果显示: 太湖污染物排放达标将极大改善富营养化水平; 但应结合经济分析和效益分析, 通过组合各类污染物控制总量来达到最优治理效果. 模拟分析表明, 单一清淤工程对于富营养化中蓝藻水华治理意义有限. 根据最新调查资料, 提出清淤工程实施的一些设想, 并指出清淤中应注意合理保护水生生物.

关键词 太湖 富营养化 生态模拟 治理对策
分类号 X524 Q949.201

蓝藻, 水华

湖泊富营养化是指湖泊等水体中接纳过多的氮、磷等营养性物质, 使湖泊生态系统结构关系发生变化, 导致藻类异常繁盛的现象, 是我国当前重大环境问题之一. 1996年国务院环境保护委员会专门就太湖环境问题在无锡召开现场办公会, 共商治太大计. 国家有关部门行动起来, 科研院所积极出谋划策, 针对太湖环境问题提出了不少治理方案. 然而从生态系统角度开展太湖富营养化研究尚为少见. 针对太湖梅梁湾这一典型富营养化水域, 太湖湖泊生态系统研究站开展了长期性物理、化学和生物学监测, 从生态系统角度研究富营养化形成机理和过程的研究逐渐得以深入^[1-7]. 作者在执行中国科学院“八五”和“九五”重点项目过程中, 开展了一系列实验生态学研究. 由于湖泊生态系统是一个结构复杂的多变量系统, 因此几乎不可能完全准确地反映其内部结构和过程变化. 尽管如此, 生态模拟作为反映生态系统多变量关系及其变化的有效方法, 在一定程度上能揭示生态系统的主要过程变化, 当然它建立在对所研究系统结构认知的基础上. 基于我们目前对于太湖生态系统和其主要问题研究认知水平, 本文尝试建立了梅梁湖区藻类生态动力学模型, 通过联系系统变量, 探讨藻类周年变化特征, 寻求治理太湖蓝藻水华的合理有效途径与方式.

1 梅梁湖区藻类生态动力学模型

1.1 模型基本假设

(1) 水域内所有状态变量和参数都与其水平空间位置无关, 即不存在空间异质性. 由于目前对梅梁湖区营养盐循环变化过程仍不明晰, 缺乏营养盐空间动态分布的量化研究, 以及水动力学特征研究的匮乏等原因; 另一方面考虑到“先研究同质情况, 后研究异质情况”之一思路,

中国科学院“八五”重点项目(Z091)、国家自然科学基金(39500027)和“九五”重点项目(KZ952-S1-220)联合资助.
收稿日期: 1998-08-15. 刘元波, 男, 1969年生, 助理研究员.

本文假设变量与参数的空间均质性.

- (2) 以微囊藻生物量变化代表该水域内藻类生物量变化.
- (3) 在模拟时间段内,外界营养盐输入浓度保持不变.
- (4) 底泥遍布于该水域,且磷释放率和沉降率保持不变.
- (5) 光照变化不受云况影响.
- (6) 藻类死亡率和浮游动物对藻类的捕食率保持不变.
- (7) 在营养盐循环中,考虑磷循环.

1.2 基本方程与函数

$$\frac{\partial A(t)}{\partial t} = (u(t) - Ma - \frac{Q}{V}) \cdot A(t) - GP(t) \cdot Zoo(t)$$

$$\frac{\partial TP(t)}{\partial t} = P_{in} + P_{ex} - P_{sc} + Ma \cdot A(t) \cdot AP_0 - UP(t) \cdot TP(t) - \frac{Q}{V} \cdot TP(t)$$

$$u(t) = u_{max} \cdot f(T(t)) \cdot f(L(t)) \cdot f(TN(t)) \cdot f(TP(t))$$

$$f(T(t)) = \exp((-2.3|T(t) - T_{opt}|)/15)$$

$$f(L(t)) = L(t)/(L(t) + KL)$$

$$f(TN(t)) = TN(t)/(TN(t) + KN)$$

$$f(TP(t)) = TP(t)/(TP(t) + KP)$$

$$L(t) = 0.46 \cdot L_0(t) \cdot \exp(-K \cdot Depth)$$

$$L_0(t) = (S/\pi) \cdot (dm/d)^2 \cdot (\sin\lambda \cdot \sin\delta \cdot H(t) + \cos\lambda \cdot \cos\delta \cdot \sin H(t))$$

$$GP(t) = GP_{max} \cdot A(t)/(A(t) + KZ)$$

$$UP(t) = UP_{max}(F_{max} - AP_0)/(F_{max} - F_{min}) \cdot TP(t)/(TP(t) + KP)$$

其中, A 为藻类生物量(mg/L); TN 、 TP 分别为湖中总氮和总磷浓度($\mu\text{g/L}$); t 为时间(d); u 为藻类生长率(d^{-1}); T 为温度($^{\circ}\text{C}$); L 为水面上光照强度($\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); GP 为浮游动物对藻类的捕食率(d^{-1}); Zoo 为浮游动物生物量(mg/L); UP 为藻类对磷的吸收率(d^{-1}); L_0 为大气顶层光照强度($\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); $Depth$ 为水深(m); S 为太阳常数; dm 为日地远日点距离, d 为日地平均距离; λ 和 δ 分别为当地的经纬度, 本文取 $31^{\circ}24'N$ 和 $120^{\circ}13'E$; H 为时角. 其它符号意义参见表 1.

通过实验数据分析和运用时间序列监测资料进行了参数估计. 参数及其取值见表 1. 由于 1995 年的资料较为完整, 我们以 1995 年环境条件为背景, 藻类生物量初值取 0.4mg/L , 考虑以下几种不同条件, 进行了数值模拟试验.

1.3 数值模拟结果

1.3.1 磷输入水平和总氮水平分别削减的情况下, 藻类生物量随时间变化 由图 1a 可见, 在磷的日输入量未削减、削减 $1/4$ 、削减 $1/2$ 和削减 $3/4$ 情况下, 藻类生物量得到不同程度的降低, 年内变化亦趋于平缓. 显然, 磷的削减能有效地降低藻类生物量. 从图 1b 模拟结果来看, 单一总氮现存量削减亦能降低藻类生物量. 与磷的输入量削减情况相比较, 总氮现存量的削减份额在 $1/4$ 水平时不如磷的输入量削减有效, 在 $1/2$ 水平时两者相当, 在 $3/4$ 水平时比磷的输入量削减有效.

1.3.2 不同磷输入水平和总氮水平下, 藻类生物量随时间变化 从图 2 模拟结果来看, 总氮和总磷的组合削减十分有效地降低了藻类生物量. 由此就引出这样的问题: 在营养盐总量控制

上,是削减总氮还是削减总磷更有效?从投入产出的角度出发,应大力控制总氮还是总磷水平?我国是发展中国家,既有环保资金一时短缺问题,又有工业经济持续发展问题,所以总磷和总氮控制达标不可能一蹴而就,需要有一个转变过程,在这一转变过程中,如果既控制总氮又控制总磷水平,两者怎样组合才能既有效控制藻类生物量,又最小限度地削减总氮和总磷水平?

表 1 模型参数表

Tab 1. Table of parameters and their values

参数	符号	单位	取值	方法
藻类最大生长率	μ_{max}	1/d	1.27	实验测定
藻中最高磷浓度	F_{max}	mg/mg	0.015	文献[8]
藻中最低磷浓度	F_{min}	mg/mg	0.001	文献[8]
藻中磷含量	AP_0	mg/mg	0.00628	文献[8]
藻对磷的最大吸收率	UP_{max}	1/d	0.005	实验测定
消光系数	K	1/m	0.77	实验测定
藻的死亡率	Ma	1/d	0.01	文献[8]调试
藻对氮的半饱和常数	KN	mg/L	4.0	实验测定
藻对磷的半饱和常数	KP	mg/L	0.35	实验测定
藻生长最佳温度	T_{opt}	°C	28	实验测定
藻生长最佳光强的半饱和常数	KL	$\mu E/(m^2 \cdot s)$	300	实验测定
浮游动物对藻的最大捕食率	GP_{max}	mg/mg	0.26	实验测定
浮游动物捕食藻类的半饱和常数	KZ	mg/mg	0.5	实验测定
磷沉降速率	P_w	$mg/(m^2 \cdot d)$	2.81	实验测定
磷释放速率	P_r	$mg/(m^2 \cdot d)$	1.83	实验测定
湖水出流量	Q	m^3/a	5.7×10^9	文献[10]
湖泊容积	V	m^3	4.43×10^9	文献[10]
磷入湖量	P_{in}	$mg/(L \cdot d)$	0.0029	文献[10]计算

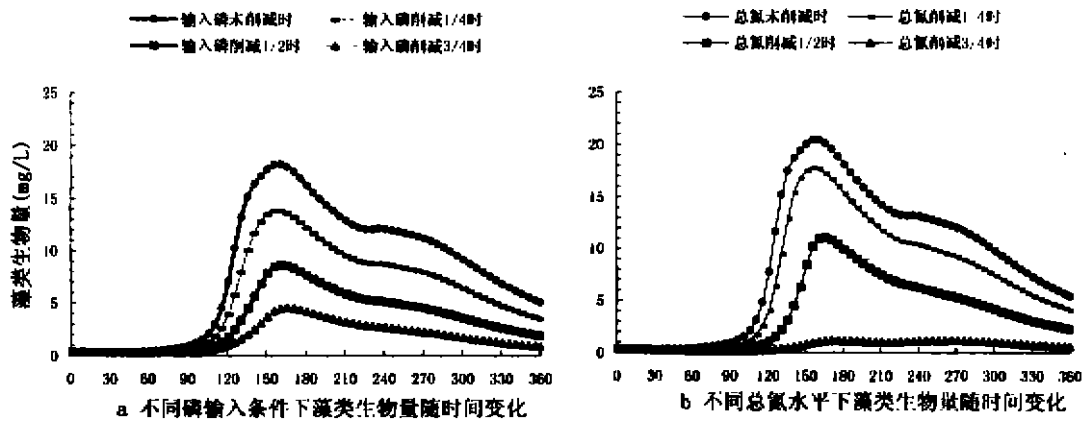


图 1 营养盐削减后藻类生物量随时间变化
Fig. 1 Algal biomass changes with days after reducing nutrients

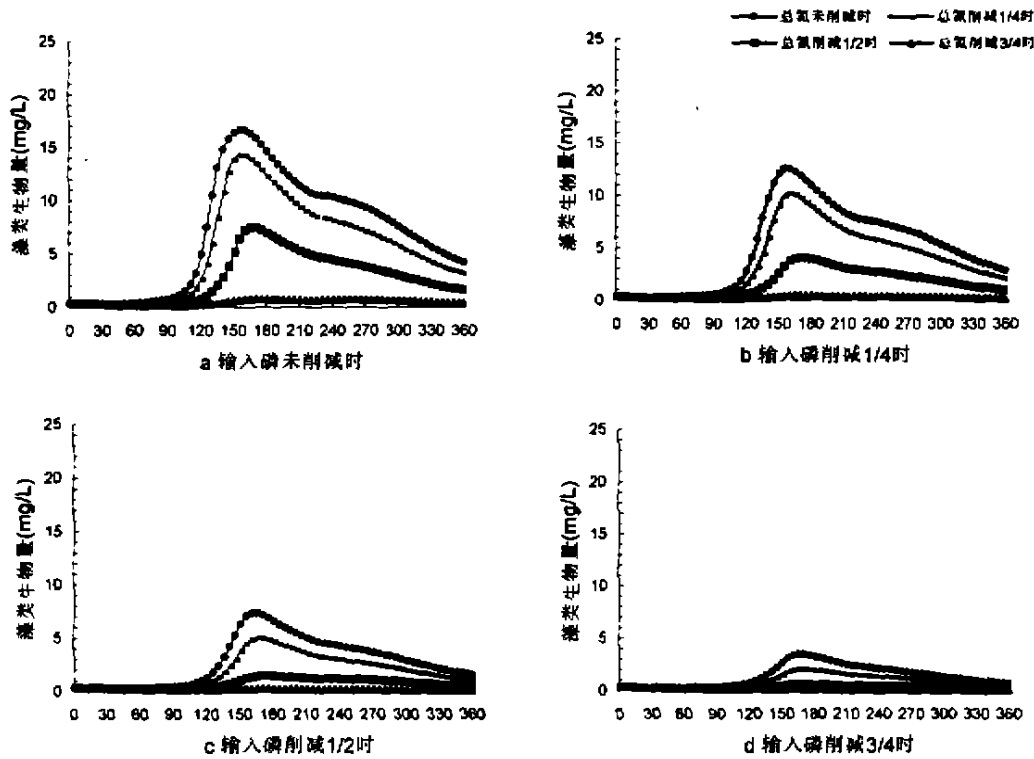


图 2 不同磷输入水平和总氮水平下,藻类生物量随时间变化
Fig. 2 Algal biomass changes with days at various input and total nitrogen levels

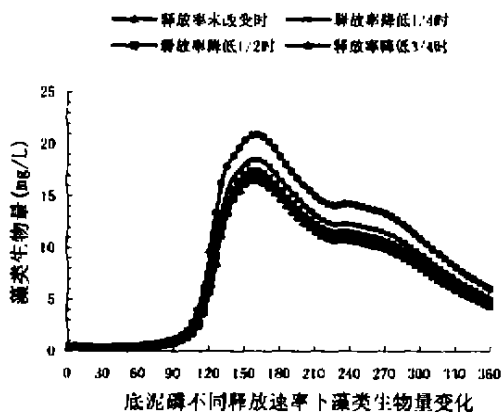


图 3 不同磷释放率时,藻类生物量随时间变化
Fig. 3 Algal biomass changes with days at various phosphorus releasing rates in sediment

1.3.3 不同底泥磷释放率时,藻类生物量随时间变化 从图 3 模拟结果来看,底泥磷释放率的改变对藻类生物量的影响很小,远不如氮磷削减有效。

2 蓝藻水华治理对策分析

藻类生物量是湖泊富营养化的重要指标之一(在富营养化指标中常用叶绿素 a 含量来代表藻类生物量)。太湖梅梁湾由于富营养化,以致每年夏季均有大量的蓝藻(以微囊藻为主)水华出现,严重地影响了无锡市及四周地区工农业生产与居民生活。如何有效地防范与控制蓝藻水华,是人们普遍关心的问题。这里将利用上述模型

模拟结果,探讨降低营养盐负荷的途径与效率。富营养化治理的重要方面之一是大大降低湖中藻类生物量。围绕降低藻类生物量这一目标,本文就富营养化治理中的几个问题提出一些分析和看法。

2.1 关于污染源控制排放

梅梁湾污染物主要来自梁溪河、直湖港和武进港。资料表明^①,三条河道污染物排放总量为,总氮 4104.64t/a,总磷 286.42t/a。污染物排放总量远远超出该湖区湖水自净能力,湖中 TP、TN 和 COD_{Mn} 浓度常年高居不下,为此有关政府管理部门提出“关停并转迁”的工业污染治理原则,并采取了一系列措施和立法,要求该湖区总氮和总磷排放量低于 561t/a 和 78t/a。这一排放标准中,总磷相当于本文模型中总量消减到 1995 年总量的 1/4 水平。在这一水平上,从图 1 模拟实验结果可以看出,藻类生物量显著下降。如果排放达标,该湖区富营养化水平将得到显著改善。

在污染源治理中,政府部门要投入大量的人力、物力和财力。为达到总量控制目标,需要投入大量资金。我国是发展中国家,污染控制要量力而行,分阶段有步骤地进行。在资金有限的情况下,如何控制各类污染物排放总量,从而实现最佳治理效果,也是一个摆在面前的问题。从模拟试验结果来看,总氮和总磷削减皆会导致藻类生物量的降低,尽管削减程度不一。如何根据当前条件,制订切实可行的、分阶段的经济投入方案,需要进行研究。削减单位数量的总氮和总磷所需要的投入,可能是有差异的。研究这一地区污染源治理所需的资金投入,根据资金情况和污染源治理的可操作性以及各类污染物削减结果对藻类生物量的量化影响,寻求最优阶段治理方案,不但将带来巨大的经济效益,也将加大治理的针对性、有效性和可操作性。

2.2 太湖底泥清淤方案分析

太湖底泥是湖中营养物质等长期沉淀的结果,是湖中营养物来源之一,对富营养化的发生起着相当大的作用。实施清淤工程,能有效地减小这一湖底营养库。若清淤工程实施,清淤后是否能达到治理富营养化的目的,尚值得商榷。国内外都有报道,清淤后湖泊的富营养化问题并没有得以根本解决。如荷兰 Loosdrecht 湖^[9],中国西湖的治理。作者运用生态模型进行模拟分析的结果表明,底泥磷释放率的降低,难以对藻类生物量产生极显著的控制效果。基于下面的方法换算,清淤可使底泥分布面积减少和底泥性质的改变,对于某一特定水域,分布面积的减少意味着该水域底泥磷平均释放率的降低。图 4 给出了底泥释放率减少后,藻类生物量随时间变化的情况。从模拟结果看,似乎清淤工程的意义不大。

从长远治理的角度来看,要根除富营养化,清淤工程势在必行,以尽可能地杜绝营养物的来源途径和数量。由国务院批准由国家环保总局编制的关于《太湖水污染防治“九五”计划及 2010 年规划》中明确提出了太湖治理的底泥疏浚示范工程。从以往的测量和研究结果看,底泥在湖中分布面积比例不大,且深度浅^[10]。1997 年 8 月,受水利部太湖流域管理局委托,作者运用 GPS 定位技术,对太湖底泥分布情况进行了大密度调查,全湖量测底泥深 600 余处。调查结果表明,太湖底泥分布面积广范围大,可占全湖总面积 67%。底泥深度多在 0—2.5m 之间,全湖底泥总量达 $1.92 \times 10^9 \text{m}^3$,详细分布情况将撰文另述。

如此巨大数量的底泥,对于太湖清淤工作是一个严峻的考验。需清淤的数量越大,意味着

^① 国家环境保护局南京环境保护科学研究所.太湖地区污染负荷分析.1996年4月国务院无锡治太会议材料.

资金投入也就越大,以清淤 10 元/ m^3 计,需投入 1.92×10^{10} 元。一次性投入如此大量的资金,显然不现实。一次性投入、实施全湖清淤工程,显然难以实施。因而应分阶段、量力而行。建议清淤工程首先在梅梁湖区和五里湖实施。该湖区是富营养化程度较高的水域,底泥分布占该水域的 $2/3$,平均厚度 1.5m,而且有机质含量高,沉积物处于还原环境,有利于营养盐的释放^[10]。另一因素是该湖区与外界水力学交换差,在污染物总量控制有效的情况下,易于巩固清淤成果。其次,在贡湖和竺山湖实施清淤工程。对大湖(太湖西部)进行清淤时,由于底泥深厚,分布范围大,要制订切实可行的阶段性组合实施方案。最后可考虑东太湖清淤工程。其原因在于该水域沿岸多为出流河道,与太湖交换强度大,清淤成果不易巩固。太湖底泥清淤工程,将给湖泊生态系统带来巨大影响。湖底状况的改变,不但影响生态系统中水生植物,也影响到水生动物,尤其是底栖动物,而底栖动物是生态系统中重要的食物链之一。清淤过程中如何保护水生生物使其保持良好的活力,是生态学界和有关政府管理部门应该予以关注的问题。

3 结语

从生态系统角度出发,运用生态模拟技术,探讨了太湖蓝藻水华治理中关于降低营养盐负荷的几个对策问题,并提出应结合经济分析和效益分析,实施分阶段、合理组合以达到最佳治理效果的目的这样一个前瞻性课题。结果显示同时削减氮磷负荷,将显著地降低藻类生物量,从而避免水华暴发。关于清淤工程,模拟结果显示效果不及降低外源负荷显著。结合最新的底泥调查资料,提出清淤工程应分阶段、有针对性地进行实施,并应注意清淤方案中合理保护水生生物即保护生态平衡。希望引起有关部门的高度重视。

参 考 文 献

- 1 蔡启铭等.太湖水质的动态变化及影响因子的多元分析.湖泊科学,1995,7(2),97-106
- 2 高锡芸等.梅梁湾及大太湖水环境现状特征与富营养化趋势分析.见:蔡启铭主编.太湖环境生态研究(一).北京,气象出版社,1998.19-29
- 3 高锡芸等.梅梁湾及大太湖富营养化限制性营养盐研究.见:蔡启铭主编.太湖环境生态研究(一).北京,气象出版社,1998.50-54
- 4 陈伟民等.太湖梅梁湖区浮游甲壳类及其摄食的研究.见:蔡启铭主编.太湖环境生态研究(一).北京,气象出版社,1998.109-118
- 5 陈宇楠等.西太湖北部微囊藻时空分布及其与光温等环境因子关系的研究.见:蔡启铭主编.太湖环境生态研究(一).北京,气象出版社,1998.142-148
- 6 蔡后建等.微囊藻水华的漂移和降解对太湖水环境的影响.见:蔡启铭主编.太湖环境生态研究(一).北京,气象出版社,1998.149-157
- 7 刘元波等.太湖北部梅梁湾水域水质因子聚类.湖泊科学,1997,9(3):253-260
- 8 Jorgensen S E. Fundamentals of ecological modeling. 2nd Edition. Amsterdam; Elsevier. 1994
- 9 Janse J H. et al. A mathematical model of the phosphorus cycle in Lake Loosdrecht and simulation of additional measures. *Hydrobiologia*. 1992, 233:119-136
- 10 孙顺才等.太湖.北京,海洋出版社,1993

Ecological Simulation of Blue Algal Bloom in Meiliang Bay, Taihu Lake and Analysis of Its Harness Strategies

Liu Yuanbo Chen Weimin Fan Chengxin Ji Jiang Gao Xiyun Chen Yuwei
(*Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008*)

Abstract

A simple algal ecological model is established based on the current knowledge on the Meiliang Bay, Taihu Lake. Combining with the ecological simulation results and the field data, we analyze the harness ways of blue algal bloom concerning pollution control and dredging engineering.

The simulation results show that, the reduction of the total nitrogen and the total phosphorus input will bring out greatly the decreasing of blue algal bloom and the reduction effect of the total phosphorus is greater than that of the total nitrogen. To reduce the bloom, the simulation result shows that it is not an effective way to reduce the sledge releasing rate. Once the water pollution control target is satisfied, the level of water bloom will decrease to the very low level. However, to optimize the achievements, it is necessary to consider both the total amounts of nitrogen and phosphorus and their ratio by the use of economical and beneficial analysis. From the simulation results and the updated investigation data of the sledge distribution in Taihu Lake, we conclude that it is very limited for algal harness to proceed the dredging engineering. Despite of this, some ways are put out to proceed the engineering while the aquatic bio-organism should be protected reasonably.

Key words Taihu Lake, eutrophication, ecological simulation, harness strategy