

武汉东湖微囊藻水华形成及消失原因的探讨 ——围圈放养实验

刘学君 谢平 王少梅 王建

(中国科学院东湖湖泊生态系统试验站, 武汉 430072)

提要 采用围圈试验的方法, 将东湖微囊藻水华的形成和消失过程重现。根据有关生物调控(Biomanipulation)的原理, 我们设计了鲢鳙草鱼的放养试验。实验结果表明: 放养鲢鳙的围圈, 水华在很短时间(约15天)内消失, 放养草鱼的围圈, 水华几乎不受影响, 而没有放养的围圈, 其水华日趋浓厚。这一结果显示滤食性鱼类对围圈内浮游生物群落结构的影响是巨大的。在实验过程中通过测定碳、氮、磷等营养元素的变化, 重点探讨了它们对微囊藻水华形成与消失过程的影响。

关键词 东湖 微囊藻水华 围圈试验 营养元素 生物调控

1 前 言

水华(Water-bloom)是一种特殊的水生生物学现象, 它的出现使水体的营养结构、代谢类型等发生了急剧变化, 它所导致的一系列水生态学变化引起了各国学者的高度重视。一般认为, 在淡水中可形成水华的种类有蓝藻门的鱼腥藻属(*Anabaena*)、束丝藻属(*Aphanizomenon*)、胶刺藻属(*Gloeotrichia*)、微囊藻属(*Microcystis*), 除此以外, 还有绿藻门和硅藻门的一些种类在条件适宜时也可引起水华。东湖研究的成果表明: 武汉东湖水华种类以微囊藻属、鱼腥藻属、水华束丝藻(*A. flos-aquae*)、颗粒直链硅藻(*Melosira granulata*)为主。而以铜绿微囊藻(*M. aeruginosa*)和水华微囊藻(*M. flos-aquae*)占优势, 一些绿藻和硅藻可能是过渡类群^[1,2]。关于水华形成的条件各国学者见解不一, 但普遍认为下列三项条件可以成立: (1) 水华种类的存在。并非所有藻类都能以营养群体的形式在底泥中安全越冬。Takamura^[3]指出: 铜绿微囊藻能更有效地形成营养群体而越冬, 这一冬眠形式成为下一届水华的“接种物”(inoculum), 他们认为: 尽管在4℃以下, 铜绿微囊藻不进行光合作用, 但它们在一般的浅水湖泊中不存在光合作用的光抑制; Takamura^[4]还详细讨论了水华种类越冬与底泥营养条件、理化条件等的关系。(2) 适度的营养条件。由于水华的出现一般伴随着水体富营养化, 人们往往由此而掩盖了微囊藻细胞对营养物需求的讨论(包括定性的和定量的)。最近的微囊藻生理生态研究表明: 适度的营养条件并非高浓度的碳、氮和磷的存在, 而是泛指细胞内外营养物质浓度以及细胞生理状态等的综合指示。对于氮磷元素的需求问题,

• 本研究得到中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室资助。实验过程中, 得到梁彦龄教授诸多指导; 成文后, 承蒙黄祥飞教授审阅全文, 在此一并致谢!

收稿日期: 1993年3月22日; 接受日期: 1993年5月27日。

各国学者莫衷一是,主要分歧表现在氮磷的绝对需求量和相对需求量上,而关于碳的研究资料相对较为匮乏。(3)其它理化条件如光照、水温、水流(Reynolds 指出:水流太大,可导致微囊藻群体漂浮机制的破坏^[5])、溶氧、电导、碱度等。

本文设计的围圈试验(受控的中型生态系统)通过了解整个过程中(包括水华出现,稳定和消失过程)碳、氮、磷的消长规律,结合生物调控措施(鱼类放养),探讨微囊藻生长规律及其水华消失的原因。

2 材料和方法

2.1 围圈的设置

东湖是长江中下游一个典型的浅水富营养湖泊,又是一个以养殖滤食性鱼类为主的多功能水体,这样整个湖泊生态系统的营养结构以浮游生物鱼类食物链为主。据统计,约有90%的渔获物是浮游生物食性的鱼类(即鲢和鳙)。关于湖泊中的生物和理化特性前人多有描述^[2,6,7]。

围圈设置在东湖水果湖湾的东湖湖泊生态系统试验站趸船边^[7],其骨架采用钢管结构,以缝合的聚丙烯塑料布围起,这样可保证在整个实验中,围圈既在外形上保持基本不变,又使内外水流达到最小的交流。本实验共设置八个围圈(标记为E₁、E₂、...E₈)。实验从7月7日开始,持续2个月,至9月7日终结。

2.2 鱼类的放养

以E₁、E₂为空白组(不放鱼),E₃、E₄放一冬龄草鱼种,E₅、E₆放鲢鱼,E₇、E₈放鳙鱼,放养时间是8个围圈都出现微囊藻水华之后的1992年8月21日,其放养密度见表1。由于此间水温均在于25℃以上,加之鱼类活动空间较小(约30 m³),鱼类生长并不明显,体重甚至略有下降。但本文只考虑鱼类生物量,对鱼类生长不作详细讨论。

表1 各围圈鱼类放养和捕获情况

Tab. 1 Stocking and harvesting of all enclosures

围 圈	鱼 类	放养(8月21日)			捕获(9月8日)		
		平均体重(g)	条 数	密度(g/m ³)	平均体重(g)	条数	密度(g/m ³)
E ₁	未放						
E ₂	未放						
E ₃	CT ¹⁾	187	3	45	174	3	42
E ₄	CT	229	3	55	231	3	37
E ₅	HY ²⁾	137	3	33	132	3	32
E ₆	HY	133	2	21	143	2	23
E ₇	AR ³⁾	233	4	75	239	4	76
E ₈	AR	216	4	69	203	4	65

1)CT:草鱼 *Ctenopharyngodon idellus*; 2)HY: 鳊鱼 *Hypohalmichthys molitrix*; 3)AR: 鳙鱼 *Aristichthys nobilis*.

2.3 采样及样品分析

所有样品都是上、中、下层的混合水样。采样时间是7月7日、7月22日、8月6日、8月20日、8月25日、9月7日,除对八个围圈进行水体生物指标、化学变量分析外,还对周边混合水样进行了同步分析。分析项目及方法如下:

(1) 总无机碳(TIC)、溶解有机碳(COD)、颗粒有机碳(POC):以 0.45 μm 孔径的玻璃纤维滤膜(Whatman GF/C)过滤水样,在 Dohmann DC-180 碳分析仪上分析 DOC、TIC,同时,得到滤膜上的干物重及无灰干重,POC 即以 0.45 乘无灰干重(AFDW)得到。

(2) 叶绿素 a(Chl-a):用玻璃纤维膜(GF/C)过滤水样,后将滤膜放入 90%乙醇中提取,用分光光度计测得酸化前后的 665 nm 和 750 nm 的吸光值,以 Lorenzen 公式^[6]算之。

(3) 总溶解氮(TDN)、总溶解磷(TDP):用半微量凯氏定氮法测定 TDN;TDN 水样先用浓硫酸硝化,然后用钼酸铵亚氯化锡显色,以分光光度法测定之。

3 结果与讨论

3.1 水华过程的描述

1992 年 7 月 7 日放置好围网后,围网内外都无水华出现。由于靠近湖岸,肉眼可见分布不匀的外源性物质,如植物孢粉、树叶等异物。两星期后,少量水华出现, E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 、 E_5 较多,经镜检,主要是一些绿藻(未鉴定到种),还有少量芜萍(*Wolffia arrhiza*)浮出水面。到 8 月中旬,水华在 8 个围网中大量繁殖,种类是以微囊藻为主的蓝藻群体。其间,我们注意到气温、水华的波动对水华种群的影响很大。通过定性观察,可以认为,水温下降到一定程度后,由于其伪空泡的形成受到抑制,导致漂浮机制的破坏,水华种群大部分下沉至底层。多数学者认为:浮游性的蓝绿藻多数喜好较高的水温,其中可形成水华的种类最适温度略低一些,一般为 25—35 $^{\circ}\text{C}$,但铜绿微囊藻有较宽的适应范围,其迅速增长的温度阈值大约在 17—18 $^{\circ}\text{C}$ ^[9]。在我们的实验期间,水温大大超过这一范围,应该说,水温提供了水华形成的必要条件。8 月中下旬,浮游动物大量出现,在数量上,以 E_4 最多,继之有 E_7 、 E_8 ,种类中溞属(*Daphnia*)枝角类占优势。8 月 21 日放养鱼类后,在 E_5 、 E_6 、 E_7 和 E_8 中,除了清晰可见的微囊藻水华群体和少量芜萍、绿藻外,还迅速出现了大量飘浮的鱼类粪便(油性),经镜检,发现大多是微囊藻,这说明:鲢、鳙的摄食和排泄是很旺盛的。而在放养草鱼的 E_3 、 E_4 中,基本上不存在鱼类粪便。这一点已经得到有关实验的证实,那种认为家鱼对微囊藻不能消化的观点应重新评价,但不可否认,水华在夜间大量消耗溶氧,以及腐烂时散发大量致毒物质(如三甲胺)等影响鱼类摄食和消化的现象是存在的。

实验结束时, E_1 和 E_2 还有大量水华, E_3 和 E_4 也有较多,但水表未见油性粪便, E_5 、 E_6 、 E_7 和 E_8 中水华完全消失。

3.2 浮游植物生物量

图 1 给出各围网(包括周边湖水)中叶绿素的含量变化。可以看出,湖水中叶绿素含量较为平缓,其变化幅度较小;在 E_1 和 E_2 中,叶绿素在达到高峰后,稍有仍高于先前; E_3 和 E_4 中叶绿素高峰出现较晚,到实验结束时与 E_1 和 E_2 的叶绿素含量基本保持同一水平上,而 E_5 、 E_6 、 E_7 和 E_8 四个围网中表现出同样的趋势,即在 8 月 20 日达到高峰后(次日放鱼),叶绿素明显下降,到结束时,基本上达到了最低水平。这说明,鱼类的放养(尤其是鲢、鳙的放养)直接或间接地降低了水华的种群;同时,我们注意到:放养鱼类后,由于 30 μ 以下的群落生物量所占比例明显增高,这说明微囊藻群体(大多数大于 30 μ)受环境条件诸如鱼类的直

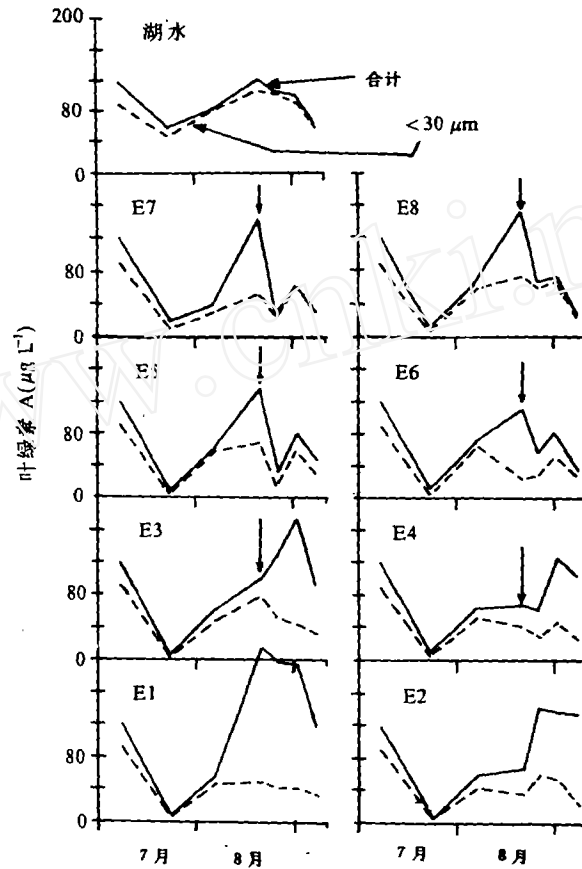


图1 水华过程中叶绿素总浓度和小于30 μ 的叶绿素总浓度

Fig. 1 Concentration of chlorophyll a in the total phytoplankton and those smaller than 30 μ during *Microcystis* bloom in the enclosures and the surrounding lake water in Donghu Lake. Arrows indicate the introduction of the fishes

接捕食和因此而导致的种类演替等影响,表现出相对较小的种群,这与 Shei 和 Liu^[2],在类似的实验中所描述的种类组成似有相同之处,即以蓝绿藻为优势种的群落逐渐在不同的处理中为隐藻门(主要是多甲藻 *Cryptomonas* spp.)、硅藻门(主要是小环藻 *Cyclotella* spp.)、甲藻门(主要是隐藻 *Peridinium* spp.)和裸藻门(主要是裸藻 *Euglena* spp.)等为优势种的群体所代替;另外,三浦等^[10]的室内实验也说明:当浮游植物现存量低时,由于条件适应,其增殖速度很快,两周即达到最大值,但随着鱼的生长,鱼的摄食强度增大,营养物供给相对匮乏,使浮游植物量下降至 63%,这一结论与我们所测到的叶绿素变化情况基本吻合。可见鱼类的放养对藻类种群的大小主群落的结构方面的影响是巨大的。另外,从大湖的情况来看,1985年后(藻类群落结构小型化和多元化)的鱼类生物量比 1985年前(以微囊藻为主)增加了约一倍,尽管围圈内鱼类生物量约为大湖的 1.5 倍(1985年后),但对浮游植物群落结构的影响近乎一致。由于在夏季(6—8月)浮游植物平均细胞体积较小,浮游植物从水柱下沉

到底泥的损失较小,其它气象和物理因子对浮游植物生物量的影响亦可忽略。再者,1985年后浮游动物生物量约为1985年前的30%(未发表资料),这样对浮游植物的捕食压力几可忽略。从鱼类的生长来看,鲢的生物量远未达到湖水的负载力,而1989/1990年后鲢的生长明显好转,生物量和生产量大增。可以这样认为:鲢的持续生长是导致浮游植物生物量下降的关键因素。

3.3 总无机碳(TIC)

实验结果(图2)表明,有机碳占水体中碳的比例相当大,它是水体碳循环的主要路线,这与Riemann等^[11]在硅藻水华现象中的发现是一致的。我们看到TIC的变化似无规则,但它是水体某时刻理化作用、生物代谢的综合体现。水体中的无机碳可从气-水界面渗透、碳酸盐碱度和呼吸活动中得到,这三个来源各自都有极大的变化范围,均可导致TIC的大幅度变化;相应,由于水体的无机碳系统中(包括游离 CO_2 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 H_2CO_3)有较强的缓冲能力,常常能使TIC保持在稳定的水平上。另外,持续的藻类增殖需要大量的碳源,但各种藻类对碳源要求不尽一致^[12],这样,一定的群落结构必然会对应一定的无机碳水平。

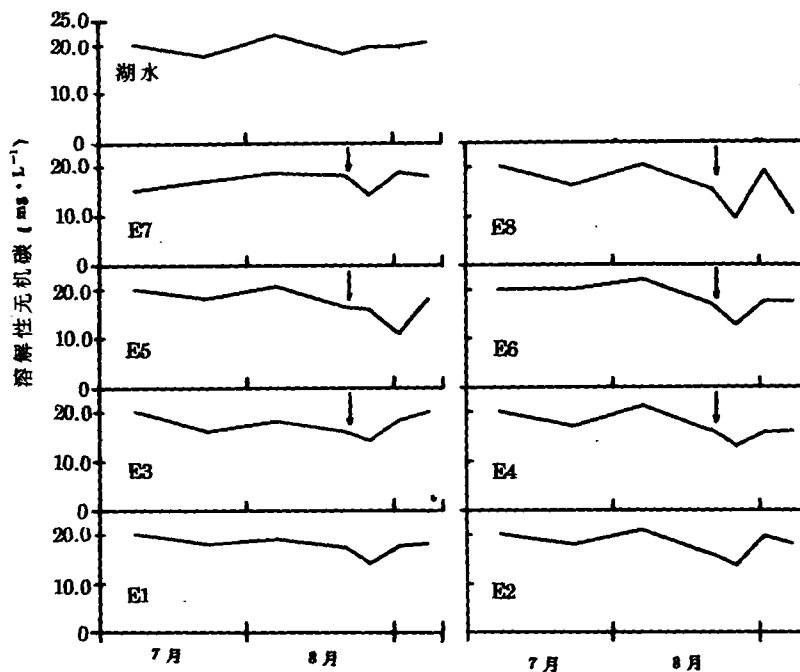


图2 水华过程中溶解性无机碳浓度

Fig. 2 Concentrations of total inorganic carbon during *Microcystis* bloom in the enclosures and the surrounding lake water in Donghu Lake.

Arrows indicate the introduction of the fishes

3.4 溶解性有机碳(DOC)和颗粒性有机碳(POC)

从实验中得到的DOC和POC数据(图3、4)来看:在整个水华过程中,DOC不存在很明显的变化,但从E₅、E₆、E₇和E₈中可看出放养鲢、鳙后,DOC有增长的趋势,而POC对鱼类的放养反应较迟钝,基本维持在同一水平上。这一结果与Riemann等^[11]所做的春季硅藻水

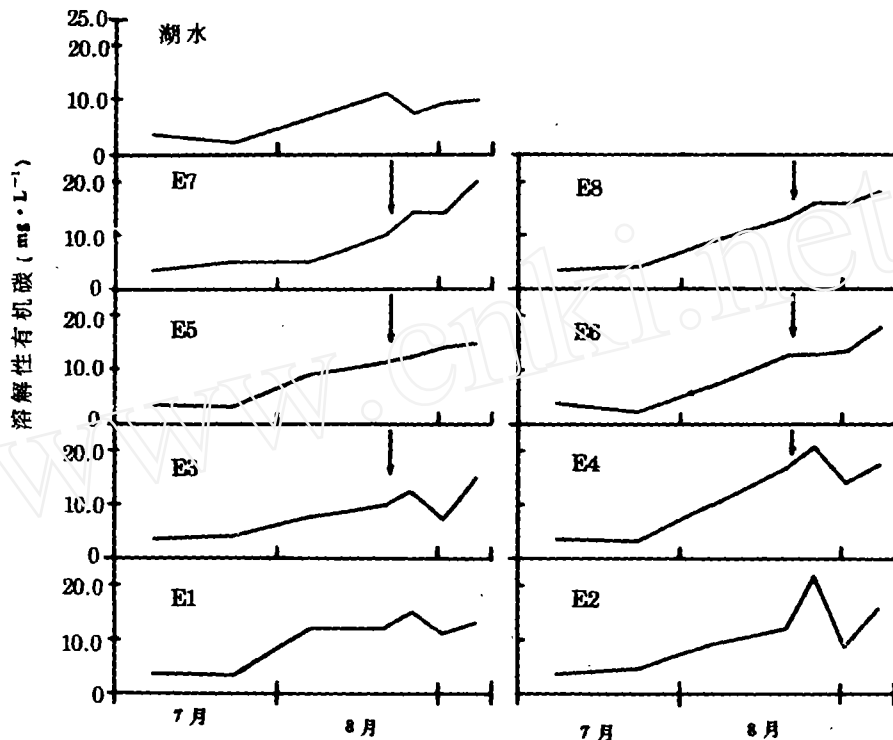


图3 水华过程溶解性有机碳浓度

Fig. 3 Concentrations of dissolved organic carbon during *Microcystis* bloom in the enclosures and the surrounding lake water in Donghu Lake.

Arrows indicate the introduction of the fishes

华过程中得到的结论基本一致。同时 DOC 和 TIC 一样,也是碳库中占优势的形式,但从两组实验中两者的比例来看则明显不一。硅藻水华中 $DOC/TIC=0.25$ (均值),而在蓝藻水华中 DOC/TIC 之比明显高于此值,有的还超过 1.0。这说明蓝藻水华过程中,特别是附加有鱼类干扰的条件下,有更多的碳固定在 DOC 库中,使碳在水体中的周转减慢。这一点又可以从 DOC 的变化幅度不大这一点得到证实:由于变化幅度不大,表明其中活动的部分即被微生物立即利用或短期内利用的并不多,而这一部分涉及到快速的碳循环^[13],而对细菌等微生物分解有强大阻力的不易分解部分在数量上相对较多,这样,DOC 库的相对稳定是不言而喻的。POC 库的更进一步稳定在某种程度上说明,随着水华的出现,各种干扰微囊藻群变化的因素如鱼类摄食、浮游动物捕食等并未使整个系统的颗粒物(假设外源性颗粒物进入是均匀的)在数量上作出反应,而是在种类组成上有很大的变化,即藻类演替、大型浮游动物的出现等。这似乎可从另一方面得到合理解释:碳元素作为能量的一种载体形式,不论它的外在表达形式如何,它被用来构成有机体的能力是一定的。

指数增长期的藻类生命活动旺盛,代谢活力强大,细胞释放大量的有机碳,即细胞外有机碳(Extracellular Organic Carbon, EOC),据 Riemann 等^[11]的推算,约有 20%的 DOC 来源于 EOC,而至少有 5%的浮游植物碳被作为 EOC 释放。随着时间的推移,藻类进入衰老期,

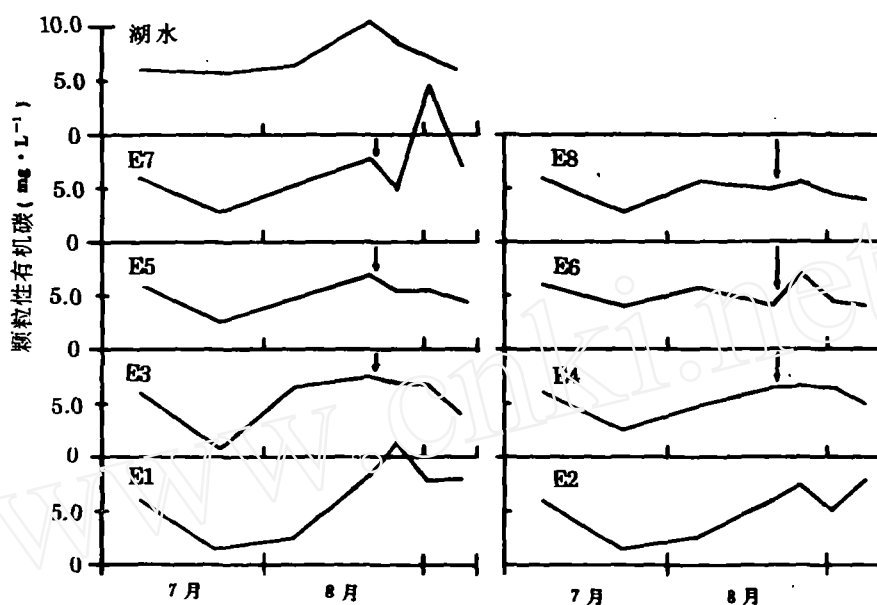


图4 水华过程中颗粒性有机碳浓度

Fig. 4 Concentrations of dissolved organic carbon during *Microcystis* bloom in the enclosures and the surrounding lake water in Donghu Lake.

Arrows indicate the introduction of the fishes

这一释放在相对值和绝对值上都达到了顶峰。另外,细胞的破损和自溶亦不可忽视,除直接增加了 DOC 量外,这一现象加快了藻类向有机碎屑的过渡,而有机碎屑则更易于被异养微生物分解和同化。

理论上讲,所有 DOC 都起源于颗粒物,这样在 DOC 和 POC 的量上一定存在着某种关系。Seki 和 Nakano^[14]比较了 POM/DOM 比值与生产力的关系,列出了不同的 POM/DOM (实际上是 POC 和 DOC 之比)所对应的水体中最重要的功能群体。从我们在实验中得到的 POC/DOC 之比来看,实验结束时,E₅、E₆、E₇ 和 E₈ 中 POC/DOC 下降幅度很大。按 Seki 等^[14]的理论,原来湖水占优势的种类是藻类,其次是细菌,再次是有机碎屑,但放养鱼类后,有机碎屑的作用加强了,它是仅次于藻类的最有代谢活力的功能类群,而细菌居其次。但所有围圈中细菌的分解作用较之外围湖水细菌作用明显加强。

3.5 总溶解氮(TDN)和总溶解磷(TDP)

水体中的 TDP 和 TDN 是很重要的两个动态库,它们是水中有机体的外源营养物,图 5、6 给出了水华过程中 TDN、TDP 的演变过程。可以看出,TDN、TDP 的均值都很高,而 N/P 处在上升趋势,特别是鱼类放养后,N/P 值增长剧烈,从其增长的幅度看,放有鱼类的围圈 E₅—E₈ 不及 E₁—E₄。微囊藻水华出现常伴有营养物的充盈,但其绝对需要量并不比其它藻类高,有时它经常是氮和磷浓度处在低谷时的优势种^[9]。我们认为:氮和磷的协同作用更重要。在这一点上,微囊藻的 pH 生理生态实验更有说服力。Shapiro^[15]在研究藻类优势种的变化时指出:只要氮磷比值保持一致(5:1),无论是什么附加条件(如 CO₂ 的加入,pH 的降

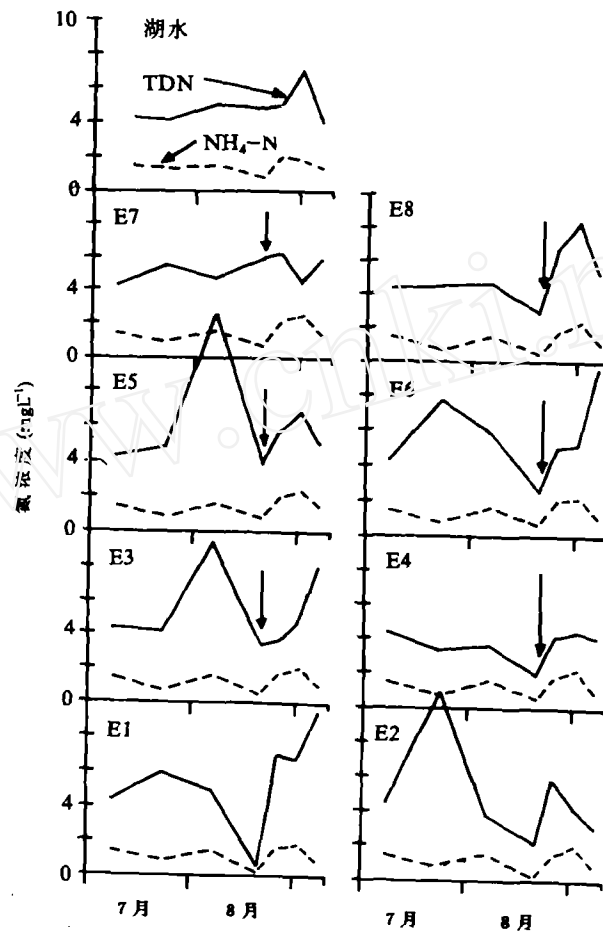


图5 水华过程中总溶解氮和氨态氮浓度

Fig. 5 Concentrations of total dissolved nitrogen and ammonium during *Microcystis* bloom in the enclosures and the surrounding lake water in Donghu Lake.

Arrows indicate the introduction of the fishes

低,单一的氮磷营养物的加入等),其优势种始终是以微囊藻为主的蓝群体;Okado和Sudo^[16]在铜绿微囊藻的室内培养中发现,微囊藻的生长速度取决于细胞的胞内磷,而不是胞外磷(亦即TDP),磷饥饿细胞可在2—3h内吸收大量的磷,一直达到自身重的2%,相反,氮的吸收速率小于磷的,而且不大依赖于细胞的生理状态;另外Smith^[17]认为铜绿微囊藻具有比其它藻类更强的氮储存能力;又如,Sirenko^[18]的大湖实验表明:微囊藻的垂直迁移对于利用底泥中的磷具有重要意义,一段时间的下迁足以补充细胞内磷的供应,当漂浮到水面后,即使在水面磷匮乏的条件下亦可大量繁殖。所有这些实验证明:微囊藻可以从环境中得到更多的氮和磷以供增殖,这种生理、生态上的特点使它较之其它藻类在环境氮和磷不太高时也会成为优势种。根据以往实验结果和我们的实验数据来看,氮和磷不是微囊藻出现的限制因子:(1)TDN、TDP并不代表微囊藻的实际需求,微囊藻在水体氮和磷足够时,可吸收和

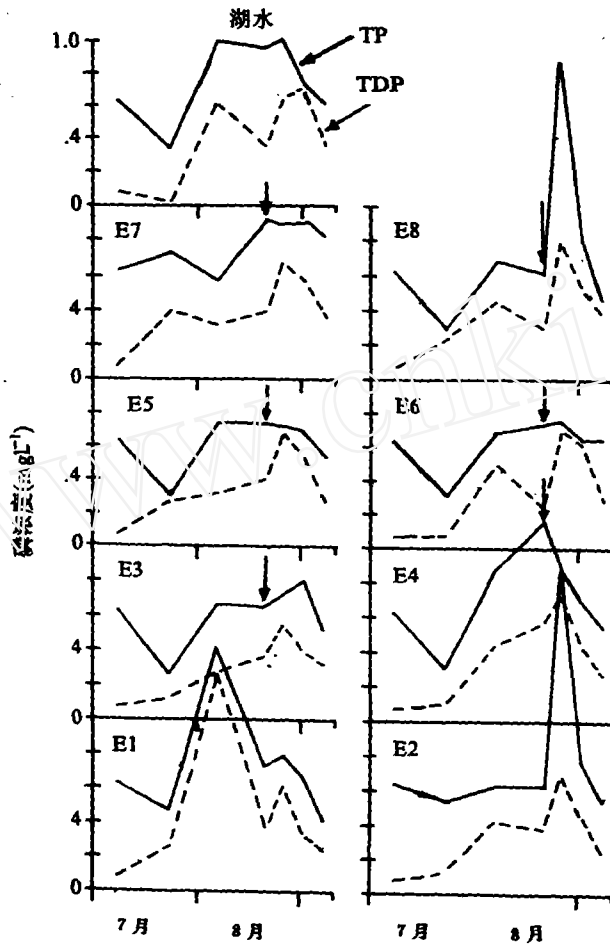


图 6 水华过程中总磷和总溶解磷浓度

Fig. 6 Concentrations of total phosphorus and total dissolved phosphorus during *Microcystis* bloom in the enclosures and the surrounding lake water in Donghu Lake. Arrows indicate the introduction of the fishes

储存过多的氮和磷即奢侈性消费(Luxury consumption)^[9]以备氮和磷匮乏时用,所以在考虑藻类的氮和磷需求时,应同时考察颗粒性的氮和磷;(2)微囊藻是富营养种类,在营养相对缺乏的条件下,一般不会以很高的生长速率增殖,这样低生长率的种类较之高生长速率种类在营养缺乏时,更不易为营养物质所限制;(3)得益于它的伪空泡调节藻体沉浮机制,微囊藻有很强的迁移能力,能大量利用水体深层的营养物。

N/P 这概念不可忽视。Smith^[17]认为:由于微囊藻在氮缺乏时也可成为优势种,而在磷的需求方面,它较之其它藻类特别是硅藻更有竞争力,所以,低的比对它生长更有利,高于 29:1 时,它将很少出现,而低于 29:1 时,有大量形成水华的可能;相反,Gerloff^[18]指出:微囊藻对 N(NH₄⁺、NO₂⁻、NO₃⁻ 等都是具有同等效力的氮源)的需求,较之对其它元素的需求高得多。在培养液中,N/P 达到 75:1 时,才能达到最大生长,他们得出结论:在自然条件下,

对于不具备固氮能力的蓝藻,氮很容易成为种群增长的限制因子。我们的结果能较好地支持这一结论,在 E_1-E_4 中实验结束时,最高值达38.8,平均值为17.84。而 E_7-E_8 中最高值为15.8,平均值仅为12.83。大湖水化学资料表明:东湖的氮和磷1985年后明显高于1985年前的水平,其N/P大都在11.8:1—15.5:1之间,这是有利于藻类特别是微囊藻生长的,同时说明氮磷并不是限制微囊藻水华出现的主要因子。

水华的出现是水体各种参数消长变化的共同结果,要采取综合的措施分析其成因,蔡庆华^①运用数学的方法,得以从诸多变量筛出密切相关的因子,构成水华出现的Fisher判别函数,这样可根据这些因子的变化趋势预测水华形成,这是有益的尝试^①,但需要更多的实验数据支持。

水华过程中还存在着种类演替现象^[20-22],限于人力,我们没有做更精确的定性、定时实验。此外,鱼类的捕食压力也是很重要的^[23,24]。Andersson等^[25]的围圈试验表明:高密度的养殖可导致高浓度的叶绿素、蓝绿藻水华、高pH和低的透明度的出现;但Hrbaeck^[22]认为:鱼类的放养对蓝绿藻水华没有直接影响,可通过影响浮游生物的群落结构,改变群落代谢等方面来间接影响,他同时承认:高密度的鱼类放养也可导致微囊藻水华和刺丝属水华的消失。我们认为:从 E_4 和 E_7 中浮游动物大量出现来看,群落结构的改变更易解释水华消失这一事实。

4 结 论

本文着重讨论了围圈实验中水华过程的各种现象,结合东湖研究的历史资料和已有成果,就碳、氮、磷等元素在水华过程中的作用得出初步结论:

(1) 无机碳和溶解性有机碳一样,在碳的代谢中占主导地位,由于各种形式的无机碳间有较强的缓冲能力,一般不会成为水华形成的限制因子;

(2) 从POC/DOC来看,围圈中的主要代谢类群发生了变化,主要表现在有机碎屑的作用加强了;

(3) 鱼类放养后,水体N/P比例增高,但没有充分的理由说明磷是水华稳定的限制因子;

(4) 鱼类对水华形成的消失过程的影响是巨大的,它主要体现在对种群结构和代谢类型上。

这一研究表明,小型围圈试验可较好地拟合和再现东湖生态系统中的群落结构变化,因而在大型湖泊生态系统中引进生物调控的机制是可能的,由此而引起的一系列生态学效应也是良好的。

参 考 文 献

- 1 林毓莲. 有机碎屑及其在东湖生态系统中的作用. 见:刘建康主编,东湖生态学研究(一),北京:科学出版社,1990.

① 蔡庆华. 武汉东湖系统生态学研究. 理学博士论文,中国科学院水生生物研究所,1992:110.

- 242—291.
- 2 Shei, P. & J. K. Liu. Studies on the influences of planktivorous fishes on the phytoplankton community in a shallow, eutrophic Chinese lake (Lake Donghu) using enclosure method. *Annual Reports of FEBL*, 1991, 15—24.
 - 3 Takamura, N., T. Iwakuma & M. Yasuno. Photosynthesis and primary production of *Microcystis aeruginosa* Kutz in lake Kasumigaura. *J. Plankton Res.*, 1985, 7(3): 303—312.
 - 4 Takamura, N., M. Yasuno & K. Sugahara. Overwintering of *Microcystis aeruginosa* Kutz in a shallow lake. *J. Plankton Res.*, 1984, 6(6): 1019—1029.
 - 5 Reynolds, C. S., Growth and buoyancy of *Microcystis aeruginosa* Kutz emend. Flenkin in a shallow, eutrophic lake. *Proc. Roy. Soc. London (B)*, 1973, 184, 29—50.
 - 6 Liu, J. K., Lakes of the middle and lower basins of the Changjiang (China). In: Toub, F. B. ed., *Lakes and Reservoirs, Ecosystems of the World 23*, Elsevier, Amsterdam 1984, 331—355.
 - 7 刘建康主编. 东湖生态学研究(一). 北京: 科学出版社, 1990.
 - 8 Lorenzen, C. J., Determination of chlorophyll and phaeopigments: spectrophotometric equations. *Limnol. Oceanogr.*, 1967, 12: 343—346.
 - 9 Reynolds, C. S. & A. E. Waboby. Water-blooms. *Biol. Rev.*, 1975, 50: 437—481.
 - 10 三浦泰成、朱志荣. 东湖鲢鱼和浮游植物定量关系的估算. *水生生物学报*, 1986, 10: 201—207.
 - 11 Riemann, B., M. Sondergaard, H. Schierup, S. Bosselmann, G. Christensen, J. Hansen & B. Nielsen. Carbon metabolism during a spring diatom bloom in the eutrophic Lake Mossø. *Int. Rev. Ges. Hydrobiol.* 1982, 67(2): 145—185.
 - 12 Wetzel, R. G., *Limnology* (2nd Edition). Saunders College Publishing, 1983.
 - 13 Sondergaard, M. & H. H. Schierup. Dissolved organic carbon during a spring diatom bloom in Lake Mossø. Denmark. *Water Res.*, 1982, 16: 815—821.
 - 14 Seki, H. & H. Nakano. Production of bacterioplankton with special reference to dynamics of dissolved organic matter in a hypereutrophic lake. *Kieler Meeresforsch Sonderh.*, 1981, 5: 408—415.
 - 15 Shapiro, J., Blue-green algae: why they become dominant? *Science*, 1973, 179: 382—384.
 - 16 Okado, M. & R. Sudo. Nutrient absorption and growth characteristics of *Microcystis aeruginosa*. Res. Rep. from the National Inst. for Environ. Studies, 1979, 8: 293—302. (In Japanese with English abstract).
 - 17 Smith, V. H., Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton. *Science*, 1983, 221: 669—671.
 - 18 Sirenko, L. A., The effects of blue-green algae on formation of algal communities and on water quality in the Dniiper Reservoirs. *Arch. Hydrobiol. Beih. Ergbn. Limnol.*, 1987, 25: 39—49.
 - 19 Gerloff, G. C., G. P. Fitzgerald & F. Skoog. The mineral nutrition of *Microcystis aeruginosa*. *Amer. J. Bot.*, 1952, 39: 26—32.
 - 20 Hammer, U. T., The succession of bloom species of blue-green algae and some causal factors. *Verh. Verein. Limnol.*, 1964, 15: 829—836.
 - 21 Fallon, R. D. & T. D. Brock. Planktonic blue-green algae: production, sedimentation, and decomposition in Lake Mendota, Wisconsin. *Limnol. Oceanogr.*, 1980, 25(1): 72—88.
 - 22 Hrbáček, J., Contribution to the ecology of water-bloom-forming blue-green algae—*Aphanizomenon flos-aquae* and *Microcystis aeruginosa*. *Verh. Verein. Limnol.*, 1964, 15: 837—.
 - 23 King, D. L., The role of carbon in eutrophication. *J. Wat. Poll. Cont. Fed.*, 1970, 42(12): 2035—2051.
 - 24 Shei P., S. M. Wang, J. Wang, X. J. Liu & J. K. Liu, Studies on the influence of three domestic carps—silver carp, bighead carp and grass carp on the water-bloom in a shallow, eutrophic Chinese lake (Lake Donghu) using enclosure method. *Annual Reports of FEBL*, 1992. (in press).
 - 25 Andersson, G., H. Cronberg, G. & C. Gelin. Effects of planktivorous and benthivorous fish on organisms and water chemistry in eutrophic lakes. *Hydrobiologia*, 1978, 59(1): 9—15.

**STUDIES ON THE CAUSES OF RESUMPTION AND
DISAPPEARANCE OF *MICROCYSTIS* BLOOM
IN DONGHU LAKE (WUHAN, CHINA):
STOCKING EXPERIMENTS IN ENCLOSURES**

Liu Xuejun Xie Ping Wang Shaomei Wang Jian

(*Donghu Lake Ecosystem Experimental Station, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072*)

Abstract

By using enclosure method, the *Microcystis* bloom which disappeared after 1985 in Donghu Lake (Wuhan, China) was successfully recovered, and some causal factors of the resumption and disappearance of the summer *Microcystis* bloom were dealt with. According to the biomanipulation theory, the authors designed a series of stocking experiments in which three domestic fishes—silver carp, bighead carp and grass carp were introduced. The results show that in the silver carp and bighead carp stocking enclosures, the bloom vanished in a short period (15 days), and no change took place in the grass carp stocking enclosures, whereas in the fish-free enclosures, the bloom was even more abundant. It is concluded that planktivorous fish have great effects on the plankton community structure of the enclosures where *Microcystis* bloom occurred. Also, the fluctuation of various forms of carbon, nitrogen and phosphorus were fully discussed in order to show some implications of their effects on *Microcystis* bloom.

Key Words Donghu Lake, *Microcystis* bloom, enclosure experiment, nutrient elements, biomanipulation.