



太湖梅梁湾水华蓝藻复苏过程的研究*

张晓峰^{1,2} 孔繁翔^{1,*} 曹焕生^{1,3} 谈建康² 陶 益² 王美林²

(¹ 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; ² 南京大学环境学院, 南京 210093; ³ 中国科学院研究生院, 北京 100039)

【摘要】 采用在底泥表面设置藻类细胞捕捉器的方法, 测定其中的色素含量变化, 并与水柱和底泥中的色素含量变化相比较。结果表明, 藻类复苏与底泥环境中的温度、光照、溶解氧、氧化还原电位均有密切关系, 叶绿素 a、b 和藻蓝素所表征的总藻类、绿藻以及蓝藻的上浮率分别为 59.84%、76.83% 和 466.98%, 3 种藻的上浮量分别占相应浮游藻类最大生物量的 7.18%、3.71% 和 9.33%。蓝藻复苏对太湖水华的形成具有很重要的意义。

关键词 太湖 水华蓝藻 底泥 色素 复苏

文章编号 1001-9332(2005)07-1346-05 **中图分类号** Q949.2; Q142.7 **文献标识码** A

Recruitment dynamics of bloom-forming cyanobacteria in Meiliang Bay of Taihu Lake. ZHANG Xiaofeng^{1,2}, KONG Fanxiang¹, CAO Huansheng^{1,3}, TAN Jiankang², TAO Yi², WANG Meilin² (¹ Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; ² School of Environmental Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China; ³ Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2005, 16(7): 1346~1350.

A collection trap was installed on the sediments in Meiliang Bay of Taihu Lake during the period from March to June to investigate the recruitment of phytoplankton, and cyanobacteria in particular. The algal abundance in the trap was monitored, and compared with that in water column and surface sediments. The results showed that the algal recruitment was related to the temperature, irradiance, DO content, and oxidation-reduction potential (ORP) in surface sediment. After over-wintering on the sediments, the colonies of cyanobacteria experienced a prior developmental process before re-invasion of the water column. During the investigation period, the recruitment rates of chlorophyll a and b and PC were 59.84%, 76.83% and 466.98%, and the recruitment amounts accounted for 7.18%, 3.71% and 9.33% of their maximum pelagic counterparts in water column, respectively. These results showed that shallow lake was the important seed bank to the pelagic populations, and water bloom was formed as the result of the recruitment and biomass accumulation of cyanobacteria.

Key words Taihu Lake, Bloom-forming cyanobacteria, Sediment, Pigment, Recruitment.

1 引言

近年来太湖随着富营养化加重, 常常发生以铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 为优势种群的水华, 水华多发生在夏季, 有明显的季节性特点^[10]。一般情况下藻类生长繁殖是缓慢的, 之所以在较短时间内形成“水华”, 很多研究表明, 底泥中的水华蓝藻复苏 (Recruitment) 及其上升是其中的关键因子之一。孔繁翔等^[16] 和阎荣等^[26] 提出假设, 将蓝藻水华的形成分为相互区别而又连续的 4 个过程, 即下沉和越冬 (休眠)、复苏、生物量增加、上浮聚集并形成水华, 并认为影响每个阶段的主导因子不同。

很多藻类可以在不适宜生长的条件下存在于湖泊底泥的表面^[21]。许多丝状蓝藻, 如 *Anabaena* 和 *Aphanizomenon* 等可以产生出被称为休眠孢子 (Akinete) 的特殊有生殖能力的细胞^[1, 11, 19]。而 *Microcystis* 和 *Gomphosphaeria* 等藻类越冬时则不发生

形态上的变化, 而只是以休眠的方式存在于底泥的表面保持活性^[4, 5, 23]。微囊藻在条件适合的时候可以在底泥中生长, 在适当条件下由底泥上升到水体中, 这便是所谓的“复苏”现象^[3, 12, 13, 24]。很多研究表明, 微囊藻的复苏与温度、光照、溶解氧、水流、浊度以及营养盐有着密切的联系^[2, 5, 12, 13, 18]。Cáeres 等^[7] 认为, 引起微囊藻恢复生长的因素可能是: 温度的升高, 底泥表面的低光强和缺氧的环境。Tsu-jimura 等^[25] 研究表明, 微囊藻群体从底泥迁移到水体的现象主要发生在湖泊的浅水区, 并认为这是由于光照刺激了底泥中微囊藻群体的生长。目前国外进行的微囊藻复苏研究大多应用于深水湖泊, 国内针对浅水湖泊中藻类复苏研究相对较少。太湖是

* 国家自然科学基金项目 (40471045)、国家重点基础研究发展规划项目 (2002CB412300)、中国科学院知识创新工程项目 (KZCX2-311)、中国科学院“百人计划”项目和中国科学院南京地理与湖泊研究所所长基金资助项目。

* * 通讯联系人。

2004-10-22 收稿, 2005-03-21 接受。



一个典型的浅水湖泊,平均深度仅 $1.89\text{ m}^{[20]}$,因此探讨藻类,特别是铜绿微囊藻的复苏与其机理以及藻类复苏对太湖水华形成的作用,不仅能够认识浅水湖泊藻类的复苏规律,而且对认识蓝藻水华形成机理也具有重要意义.本研究在太湖底泥表面安放特制的藻类细胞捕捉器,通过检测其中的藻类复苏状况来研究太湖藻类复苏的过程,为探索太湖水华的形成机理提供必要的实验基础.

2 材料与方法

2.1 采样点选择

捕捉器安放在太湖梅梁湾湖区 1 号点($31^{\circ}25'53.4''\text{N}$, $120^{\circ}12'42.5''\text{E}$),梅梁湾位于太湖最北部,北接无锡市,南北长 14 km ,东西长约 $8\text{ km}^{[8]}$,是近年来太湖富营养化较为严重的湖区.同时在太湖湖心 2 号点($31^{\circ}20'59.8''\text{N}$, $120^{\circ}11'16.7''\text{E}$)取样作对照.

2.2 采样器材与方法

采样点固定金属支架,将 3 个特制 30L 藻类捕捉器固定在支架上,下端插入底泥.为使捕捉器内外条件一致,在壁上每隔 10 cm 钻两排直径 1 cm 的小孔,外覆透水性 $3\text{ }\mu\text{m}$ 孔径的滤膜(Sefar, Switzerland),这样能够在去除藻类影响的同时,保证捕捉器内外的水流和营养盐交换.

3 个藻类捕捉器于 2004 年 3 月 2 日安放,安放完毕后用 12V 直流水泵(Rule, USA)抽干捕捉器中湖水,湖水通过滤膜渗入捕捉器内,使其中藻类数目起始为零.采样时间为 2004 年 3~6 月,每周 1 次,分别使用水泵采集 3 个捕捉器内、湾区和湖心水样,并抽空捕捉器中湖水,以去除其藻类,不含藻细胞的湖水经过滤膜可再次进入捕捉器中,随后 1 周在捕捉器中采样所测得的藻细胞生物量即可认为主要来自底泥上浮.使用柱状采泥器采集湾区和湖心底泥 $0\sim 2\text{ cm}$ 样品.藻类捕捉器外的梅梁湾采样点底泥上覆水层的温度(Temp)、溶解氧(DO)、pH、氧化还原电位(ORP)和补偿电导(SpCond),使用多参数水质监测仪(6600, YSI, USA)在每次采样时同步原位测定.

2.3 分析器材与方法

将采集的水样分两部分,一部分加入鲁古氏碘液固定后,使用显微镜(Nikon E-600, Japan)观察藻类组成和数量,另一部分水样与采集的泥样按照文献方法提取其中色素,并使用荧光分光光度计(RF-5301PC, Shimadzu Corporation, Japan)测出其中藻类的叶绿素 a(Chl a)、叶绿素 b(Chl b)和藻蓝素(CPC)含量^[9,26].在所有可发生光合作用的藻类中均能发现叶绿素 a,而在绿藻和裸藻中只含有叶绿素 b,在蓝藻、红藻和隐藻中含有藻蓝素^[17].而本次实验在太湖水体和底泥中未发现裸藻、红藻和隐藻的存在,因而叶绿素 a、叶绿素 b 和藻蓝素含量可以分别表征水体和底泥中藻类总量、绿藻数量和蓝藻数量,藻蓝素与叶绿素比值(CPC/chlorophyll)表征蓝藻在藻类中所占比例和蓝藻种群的相对优势.同时参

照文献^[6],将水体中复苏产生的藻类色素总量与藻细胞捕捉器内初始状态底泥中藻类色素含量的比值,定义为藻类的总上浮率,并以此说明藻类的复苏强度.下文每月色素变化量均为该月内 4 周数据之和.

3 结果与讨论

3.1 藻细胞捕捉器内、梅梁湾区和湖心水体藻类数量变化

由于安放的藻类捕捉器有一个在实验过程中损坏,本文中后两个月的数据均为两个捕捉器的平均值.如图 1 所示,藻细胞捕捉器内复苏的藻类总量在 4 月达到了高峰,此时叶绿素 a 含量为 $52.63\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,而后持续下降;蓝藻复苏也有同样趋势,在 4 月藻蓝素达到最高浓度值 $3.94\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$;叶绿素 b 在 3 月有最高浓度值 $3.56\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,说明在实验进行的 3~6 月间,藻细胞捕捉器内复苏绿藻数量持续下降;捕捉器内藻类中蓝藻比例在 3~5 月持续上升,最高值达到了 0.0816,进入 6 月后下降至 0.0309.

叶绿素 a、b 和藻蓝素在 3 月初底泥中起始浓度为 239.45 、 8.93 和 $1.89\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,它们所分别表征的总藻类、绿藻以及蓝藻,在 4 个月内总上浮率,经计算为 59.84% 、 76.83% 和 466.98% . Brunberg 等^[6]1999 年 6~9 月在 Limmaren 湖进行的实验中测得的微囊藻上浮率为 244% ,太湖平均水深和水力停留时间平均为 1.89 m 和 $264\text{ d}^{[10]}$,而 Limmaren 湖的相应数值为 4.7 m 和大约 6 d ,两湖在水流扰动程度和底泥初始藻类含量上的不同,很大程度上影响了上浮率的不同.本实验中 3 种藻的上浮量分别占浮游藻类最大生物量 7.18% 、 3.71% 和 9.33% . Brunberg 等^[6]在 Limmaren 湖中测得的微囊藻上浮量只占浮游藻类最大生物量的 0.5% , Trimbee 等^[24]在 Guelph 湖测得的比例为 $2\%\sim 4\%$,这些都说明了水柱中藻类在达到最大量之前要进行 5~6 次的倍增.太湖藻类上浮量所占最大生物量的比例较大,也说明了复苏作用对太湖水华的形成有着更为重要的意义.

如图 1 所示,湾区和湖心水体中色素变化趋势基本一致,说明两区域水中的藻类生长状况近似.藻类总量和绿藻数量在两个采样点水域中 3~6 月间均有所波动,并呈 4 月和 6 月较高,3 月和 5 月较低的趋势;而蓝藻数量在 3~5 月变化不大,进入 6 月后数量在湾区和湖心均快速增加,湾区和湖心藻蓝素的最高浓度均出现在 6 月,分别为 85.51 和

34.10 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 分别是 5 月相应浓度的 6.9 和 3.4 倍; 两处水体中蓝藻在藻类中所占比例变化趋势也基本一致, 先下降至 4 月的最低点后, 持续上升, 至 6 月份最高值湾区水体中蓝藻比例为 0.55, 湖心对照为 0.40, 说明蓝藻复苏后在湾区和湖心水体中相对其它藻类存在生长优势。

同时, 除 3 月藻蓝素浓度和 5 月叶绿素 a 浓度, 湾区水体低于湖心对照之外, 其他月份叶绿素 a、叶绿素 b 及藻蓝素浓度均为湾区水体高于湖心对照, 最大差距达到近 3 倍, 说明湾区富营养化程度要比

湖心严重的现状^[15]. 而湾区及湖心水体各项色素浓度均高于藻细胞捕捉器内的色素浓度, 也说明藻类复苏之后在水中可以生长^[6, 14, 24, 25].

3.2 湾区和湖心底泥中藻类数量变化

湾区和湖心底泥中的色素含量变化如图 2 所示. 3 种色素在湾区底泥中的变化与湖心对照基本一致. 叶绿素 a 和 b 在湾区和湖心底泥中含量在 3~6 月内持续降低; 而蓝藻数量则表现为先缓慢上升, 进入 6 月后下降的趋势, 藻蓝素在湾区和湖心底泥中的最高含量均出现在 5 月, 分别是 41.10 和

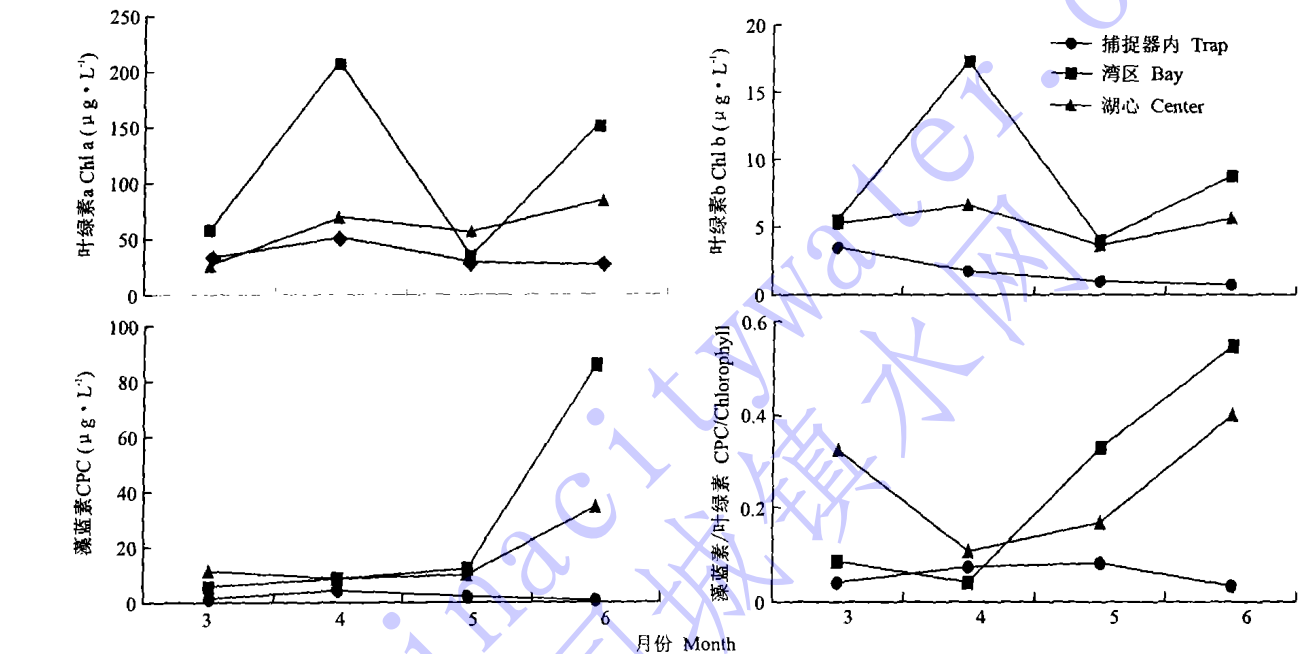


图 1 藻细胞捕捉器内、梅梁湾区和湖心水体藻类含量变化
Fig.1 Algal abundance in the water column in the recruitment trap, Meiliang Bay and the center of Taihu Lake.

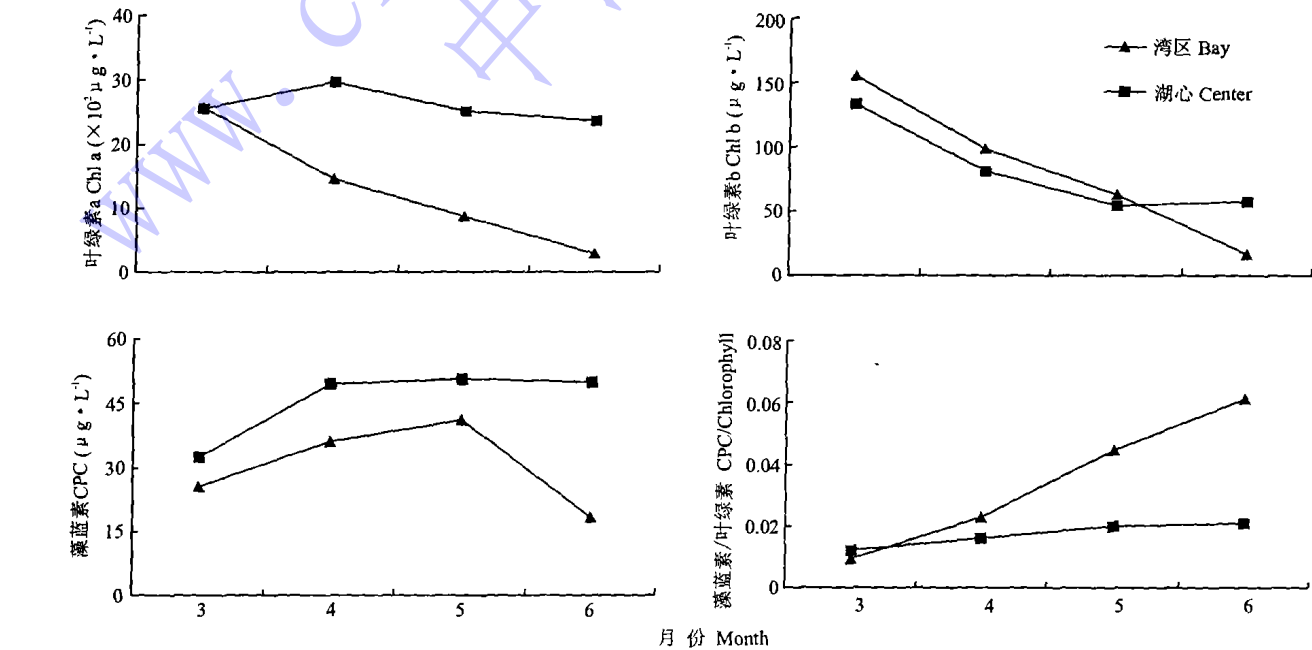


图 2 湾区和湖心底泥中的藻类数量变化
Fig.2 Algal abundance in the upper 0~2 cm surface sediments in Meiliang Bay and the center of Taihu Lake.



$50.65 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$;蓝藻在底泥藻类中所占比例,在湾区和湖心均保持上升趋势,6月最大值分别为0.0611和0.0207。

将图1与图2相比较,可以看出3种色素在藻细胞捕捉器内水中的变化与在湾区底泥中的变化呈正相关关系,说明复苏藻类生物量大小一定程度上取决于底泥中藻类生物量的大小,由此可以确认藻类从底泥向水中迁移的复苏过程,而将湾区及湖心水中色素与底泥中色素对应比较,则没有发现明显的消长趋势,说明水中藻类不完全取决于底泥中藻类的复苏,还与水中已有藻类和其他条件有关^[6],甚至水流所引起的藻类的水平迁移也会导致水体中藻类数目的变化^[28]。

如图2所示,湾区底泥中藻类生物量低于湖心对照,而图3中湾区水体中藻类生物量却高于湖心对照,说明复苏过程不是导致水华发生的主要因素,水体中藻类生物量增加更多来源于自身的生长,梅梁湾区较高的富营养化程度有利于藻类的生长^[27],导致湾区水体中的藻类多于湖心。

从图1和图2还可以看出,蓝藻所占总藻类的比例在藻细胞捕捉器内,湾区和湖心水体,以及湾区和湖心底泥中存在明显差异,即底泥中<藻细胞捕捉器内<水体中,说明蓝藻相对其它藻类较容易复苏,并更容易在水中生长。Annika等^[2]也曾发现过类似现象,并解释为蓝藻营养价值低,本身具有毒性,因而它的复苏和生长都较少受到浮游动物捕食的负面影响^[2]。

3.3 湾区底泥上覆水水质参数变化

实验期间梅梁湾区底泥上覆水水质参数变化如图3所示,其中pH在7.4~8.2之间变化,ORP在143 mV和307 mV之间波动,温度随季节变化逐渐由9℃上升至26℃左右,补偿电导3、4月间较高,5、6月较低,基本维持在 $0.6 \sim 0.7 \text{ ms} \cdot \text{cm}^{-1}$ 之间,DO含量有相似的变化规律,3、4月间最高值可达 $15.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,进入5、6月下降至 $4 \sim 6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

Brunberg等^[5]通过实验证明在黑暗及缺氧状态,微囊藻生长得较好。Cáeres等^[7]则认为,温度升高,到达底泥的低光强和缺氧环境会导致微囊藻恢复生长。Mechthild等^[18]和 Schelske等^[22]还指出,在浅水湖泊中,除营养盐、温度、光照等物化因子的影响外,还需考虑风浪所引起的底泥悬浮会有利于蓝藻的复苏生长。本实验中使用多参数水质监测仪测得的数据也可说明上述结论。实验开始的3~4月间,底泥温度由9℃上升至19℃左右,图1中藻细

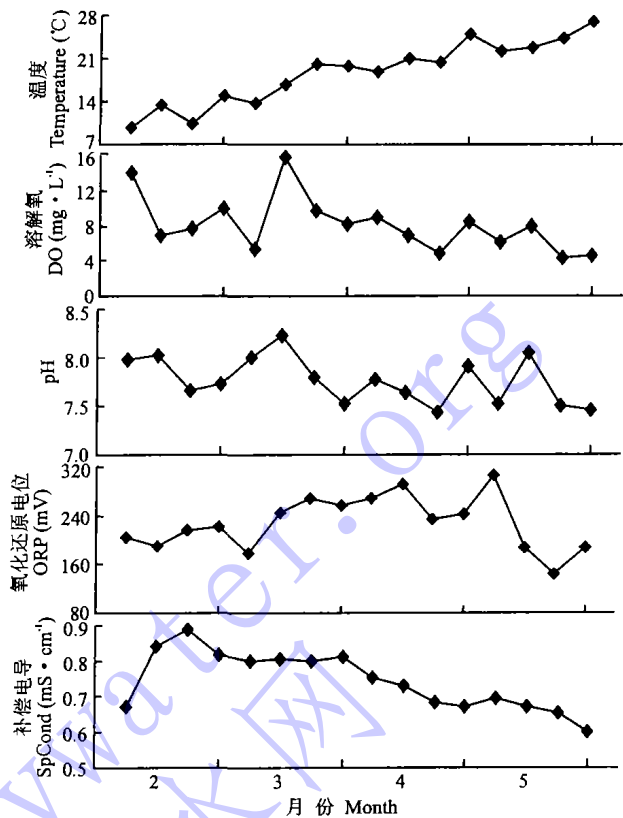


图3 湾区底泥上覆水水质参数变化

Fig.3 Changes of sediment-covering water quality indices in Meiliang Bay.

胞捕捉器内叶绿素a和藻蓝素值上升,说明藻类由底泥进入水体的复苏活动增强。太湖补偿深度(光强为表面光强的1%的深度)是在水下大约1 m深,测得到达底泥表面的光强低至 $1.0 \times 10^{-2} \mu\text{Einst} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,这样的低光强会有利于微囊藻复苏的发生。太湖为浅水湖泊,水流扰动较为频繁,底泥时常处于好氧状态,本实验测得底泥上覆水中DO浓度平均在 $8.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,最高值为 $15.82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,ORP则在143和307 mV之间波动,因而在底泥表面基本为好氧环境,这会阻碍微囊藻的复苏生长,但水流扰动,会对微囊藻从底泥进入水体有一定促进作用。

本实验参照Brunberg等^[6]的方法,定制了复苏实验的藻类捕捉器,为了排除捕捉器内原有水中藻细胞自然增值对实验结果的干扰,对方法进行了改进,即每次采样后抽干捕捉器中的湖水,经过滤膜再次进入捕捉器中的湖水没有藻细胞,因此可以确定一段时间后捕捉器内的藻细胞主要来自于底泥表面的上浮。通过检验,发现捕捉器中抽出的湖水温度、pH和营养盐与外界湖水差异很小,因此捕捉器内的原位理化条件也得到了较好的保持。然而,本次实验藻类捕捉器内与外界环境条件仍与真实的原位条件有一定区别,即捕捉器内不是开放体系,缺少水体扰



动,这种差别会对藻类复苏和上浮的测定有一定影响。

在实验开始阶段,用 Nikon 显微镜对铜绿微囊藻进行镜检,没有发现微囊藻有胶鞘存在,而随着采样时间的推移,微囊藻聚成较大的藻团。水华形成时的微囊藻大部分为群体,并聚积在一起,因而可以断定水华不是瞬时或在短时期内形成的,它的形成是一个藻类逐渐增殖、形成群体和生物量积累的过程。

参考文献

- Annika SD, Lars-Anders H. 2002. Effect of bioturbation on recruitment of algal cells from the "seed bank" of lake sediments. *Limnol Ocean*, 47(6): 1836~1843
- Annika SD, Lars-Anders H, Mikael G. 2003. Recruitment of resting stages may induce blooms of *Microcystis* at low N:P ratios. *J Plankton Res*, 25: 1099~1106
- Barbiero RP, Kann J. 1994. The importance of benthic recruitment to the population development of *Aphanizomenon flos-aquae* and internal loading in a shallow lake. *J Plankton Res*, 16: 1581~1588
- Barbiero RP, Welch EB. 1992. Contribution of benthic blue-green algal recruitment to lake populations and phosphorus translocation. *Freshw Biol*, 27: 249~260
- Brunberg AK, Blomqvist P. 2002. Benthic overwintering of *Microcystis* colonies under different environmental conditions. *J Plankton Res*, 24: 1247~1252
- Brunberg AK, Blomqvist P. 2003. Recruitment of *Microcystis* (Cyanophyceae) from lake sediments: The importance of littoral in-ocula. *J Phycol*, 39: 58~63
- Côeres O, Reynolds CS. 1984. Some effect of artificially-enhanced anoxia on the growth of *Microcystis aeruginosa* Kütz. emend. Elenkin, with special reference to the initiation of its annual growth cycle in lakes. *Arch Hydrobiol*, 99: 379~397
- Chen W-M (陈伟民), Qin B-Q (秦伯强). 1998. The zooplankton distribution during winter and early spring and its environmental effects in Meiliang Bay, Taihu Lake. *J Lake Sci (湖泊科学)*, 10(4): 10~16 (in Chinese)
- Chen Y-W (陈宇伟), Gao X-Y (高锡云). 2000. Comparison of two methods for phytoplankton chlorophyll a concentration measurement. *J Lake Sci (湖泊科学)*, 12(2): 185~188 (in Chinese)
- Chen YW, Qin BQ, Teubner K, et al. 2003. Long-term dynamics of phytoplankton assemblages: *Microcystis*-domination in Lake Taihu, a large shallow lake in China. *J Plankton Res*, 25: 445~453
- Gu H-F (顾海峰), Lan D-Z (蓝东兆), Fang Q (方琦), et al. 2003. Distribution and germination of *Alexandrium* sp. cysts in coastal areas of Southeast China Sea. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, 14(7): 1147~1150 (in Chinese)
- Hansson LA. 1996. Algal recruitment from lake sediments in relation to grazing, sinking, and dominance patterns in the phytoplankton community. *Limnol Ocean*, 41: 1312~1323
- Hansson LA, Rudstam LG, Johnson TB, et al. 1994. Patterns in algal recruitment from sediment to water in a dimictic, eutrophic lake. *Can J Fish Aquat Sci*, 51: 2825~2833
- Head AM, Jones RI, Bailey-Watts AE. 1999. An assessment of the influence of recruitment from the sediment on the development of planktonic populations of cyanobacteria in a temperate mesotrophic lake. *Freshw Biol*, 41: 759~769
- Jin X-C (金相灿), Ye C (叶春), Yan C-Z (颜昌宙), et al. 1999. Comprehensive treatment plan for key-polluted regions of Lake Taihu. *Res Environ Sci (环境科学研究)*, 12(5): 1~5 (in Chinese)
- Kong F-X (孔繁翔), Yan R (阎荣), Han X-B (韩小波). 2003. Proposal and preliminary research on the forming mechanics of cyanobacteria bloom in eutrophic lake. In: The Third International Symposium for Strategies on Toxic Algae Control in Lakes and Reservoirs for Establishment of International Network. Wuxi, China. 271~277 (in Chinese)
- Lee RE. 1989. *Phycology*. 2nd. Cambridge: Cambridge University Press. 13~22
- Mechthild S, Brigitte N. 1999. Spring phytoplankton dynamics in a shallow eutrophic lake. *Hydrobiologia*, 408/409: 269~276
- Paerl HW. 1988. Growth and reproductive strategies of blue-green algae (Cyanobacteria). In: Sandgren CD ed. *Growth and Reproductive Strategies of Freshwater Phytoplankton*. Cambridge: Cambridge University Press. 261~315
- Qin B-Q (秦伯强), Hu W-P (胡维平), Chen W-M (陈伟民), et al. 2000. Studies on the hydrodynamic processes and related factors in Meiliang Bay, North Taihu Lake, China. *J Lake Sci (湖泊科学)*, 12(4): 327~334 (in Chinese)
- Reynolds CS. 1987. Cyanobacterial Water-Blooms. *Adv Bot Res*, 13: 67~143
- Schelske CL, Carrick HJ, Aldridge FJ. 1995. Can wind-induced resuspension of meroplankton affect phytoplankton dynamics? *J N Am Benthol Soc*, 14: 616~630
- Takamura NM, Yasuno M, Sugahara K. 1984. Overwintering of *Microcystis aeruginosa* Kütz. in a shallow lake. *J Plankton Res*, 6: 1019~1029
- Trimbee AM, Harris GP. 1984. Phytoplankton population dynamics of a small reservoir: Use of sedimentation traps to quantify the loss of diatoms and recruitment of summer bloom-forming blue-green algae. *J Plankton Res*, 6: 897~918
- Tsujimura S, Tsukada H, Nakahara H, et al. 2000. Seasonal variations of *Microcystis* populations in sediments of lake Biwa, Japan. *Hydrobiologia*, 434: 183~192
- Yan R (阎荣), Kong F-X (孔繁翔), Han X-B (韩小波). 2004. Analysis of the recruitment of the winter survival algae on the sediments of Lake Taihu by fluorometry. *J Lake Sci (湖泊科学)*, 16(2): 163~168 (in Chinese)
- Yang D-T (杨顶田), Chen W-M (陈伟民), Jiang J (江晶), et al. 2003. Effects of algal bloom on N, P and K contents in Meiling Bay of Taihu Lake. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, 14(6): 969~972 (in Chinese)
- Yang Q-X (杨清心). 1996. Algal bloom in Taihu Lake and its control. *J Lake Sci (湖泊科学)*, 8(1): 67~74 (in Chinese)

作者简介 张晓峰,男,1982年生,在读硕士.主要从事湖泊污染生态学研究. E-mail: njuzxf@yahoo.com.cn