

## 太湖底泥水华蓝藻复苏的模拟\*

陶 益<sup>1,2</sup>, 孔繁翔<sup>1\*\*</sup>, 曹焕生<sup>1,3</sup>, 张晓峰<sup>2</sup>

(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:** 本实验采集太湖梅梁湾底泥及上覆水, 在保持底泥表面完整的前提下在实验室中建立湖泊生态系统模拟装置, 探索太湖底泥中蓝藻种群的复苏规律. 经 60 d 光照升温培养, 显微观察蓝藻复苏细胞, 测定底泥和上覆水中的色素含量. 结果表明, 在室内模拟条件下, 太湖底泥蓝藻复苏初始时主要以 2–8 个细胞的小群体存在, 其细胞直径为 7.2–7.8  $\mu\text{m}$ , 大于夏季的藻群体中的细胞直径(4.8–6  $\mu\text{m}$ ). 底泥蓝藻的复苏过程与环境温度变化密切相关. 蓝藻在水体温度达到 14  $^{\circ}\text{C}$  时开始少量进入水柱中, 在环境温度升至 18–20  $^{\circ}\text{C}$  之间时大量进入水中, 为水华形成提供了种源. 底泥蓝藻的最佳复苏温度(18–20  $^{\circ}\text{C}$ ) 高于非蓝藻的复苏温度(14–18  $^{\circ}\text{C}$ ), 高温对蓝藻复苏更为有利.

**关键词:** 蓝藻; 复苏; 温度; 底泥; 太湖

## Simulative Recruitment of *Microcystis* from the Surface Sediment in Taihu Lake

TAO Yi<sup>1,2</sup>, KONG Fanxiang<sup>1</sup>, CAO Huansheng<sup>1,3</sup> & ZHANG Xiaofeng<sup>2</sup>

(1: Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China)

(2: School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210093, P. R. China)

(3: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, P. R. China)

**Abstract:** A simulative experimental appliance was designed to investigate the *Microcystis* recruitment from surface sediments of Taihu Lake. Intace surface sediments from Taihu Lake were put into the appliance bottom and the filtered lake water of Taihu Lake was gently added on preset surface sediments. During the culture period, the recruited cells were observed and photographed with an epi-fluorescence microscope. Meanwhile, effect of temperature on the recruitment of *Microcystis* colony has been studied. Results showed that under simulative conditions, the recruiting population was composed of 2–8 cells mostly. The cell diameter was about 7.2–7.8  $\mu\text{m}$ , larger than that of the colonial cell in summer(4.8–6  $\mu\text{m}$ ). The recruitment of *Microcystis* colony from the sediment was affected significantly by temperature. *Microcystis* in the sediment started to move into the water column when temperature reached 14  $^{\circ}\text{C}$ . With increasing of temperature, the recruitment rate of *Microcystis* rose gradually and reached its maximum at 18–20  $^{\circ}\text{C}$ . The optimal temperature for recruitment of *Microcystis*, 18–20  $^{\circ}\text{C}$ , is higher than that of other algae, 14–18  $^{\circ}\text{C}$ . The results suggested that the enhancement in temperature would be advantageous to the recruitment of *Microcystis*.

**Keywords:** *Microcystis*; recruitment; temperature; sediment; Taihu Lake

蓝藻中的微囊藻(*Microcystis*) 在生长环境不利时会在底泥表面积累, 进入休眠状态<sup>[1–4]</sup>, 等到环境条件适宜时, 开始生长, 迁移到水中, 这便是所谓的“复苏”(recruitment) 现象<sup>[1,5–8]</sup>. 这种生长策略可以使微囊藻度过生长环境恶劣的时期从而为种群再生长提供了必需的“种源(Inoculum)”<sup>①</sup>[9,10]. 这是一个逐步积累

\* 国家自然科学基金项目(40471045)、国家重点基础研究发展计划项目(2002CB412300)和中国科学院南京地理与湖泊研究所所长基金和中国科学院百人计划项目共同资助. 2004–10–12 收稿; 2005–04–05 收修改稿. 陶益, 男, 1980 年生, 硕士研究生. E-mail: njutaoyi@yahoo.com.cn.

\*\* 通讯联系人, E-mail: fkong@niglas.ac.cn.

① 宋立荣. 优势水华蓝藻复苏过程与影响因素——兼论微囊藻群体形成与消解的生理生态学意义. 香山科学会议“我国湖泊富营养化的发生机制与控制对策”学术讨论会会议交流材料. 2003.

的量变到质变的缓慢过程,整个过程受到环境因素特别是物理因子的影响较大.因此孔繁翔等提出假设,将蓝藻水华的形成分为相互区别而又连续的四个过程:下沉和越冬(休眠)、复苏、生物量增加、上浮聚集并形成水华,并认为每个阶段的主导影响因子不同<sup>①</sup>.

休眠的微囊藻复苏受到许多环境因素的影响,研究表明,微囊藻的复苏与温度,光照,溶解氧,以及营养盐有着密切的联系<sup>[2,5-7,11]</sup>. Cáeres<sup>[12]</sup>认为在野外深水湖泊中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环境. Reynolds<sup>[3]</sup>提出,在野外深水湖泊中当水体的温度达到7-8℃时,微囊藻群体在底泥中开始缓慢的生长;微囊藻群体在15℃时,生长速率增大,并且开始少量地迁移至水体中.李阔宇<sup>[9]</sup>等于室内研究武汉东湖底泥,认为底泥中微囊藻的复苏在15℃时开始启动,存在于底泥中的微囊藻迁移至上层水体的最适条件以及生长的最适温度为20℃.但对于10-15℃和15-20℃两个温度区间中水华蓝藻的复苏情况尚未见模拟研究,水华蓝藻的复苏起始温度和复苏最适温度并不明确.由于水华蓝藻的复苏过程相当复杂,同时由于实验技术的限制,对于水华蓝藻复苏和从底泥中进入水体过程仍然没有一个完整的认识.目前,国外进行的水华蓝藻复苏研究大多应用于深水湖泊,国内外针对浅水湖泊中藻类复苏的研究较少,针对底泥中水华蓝藻的生理生长特性和复苏机制的室内研究更少,已进行的室内模拟实验为培养基实验,其实验周期短,与自然情况相差较大.因此在室内控制条件下,针对浅水湖泊水华蓝藻复苏建立更为接近自然条件的研究方法,对于认识浅水湖泊藻类复苏规律具有重要意义.由于现有的分析手段难以直接测定底泥中越冬的水华蓝藻细胞的数量,因此本文中模拟实验着重于研究应用藻蓝素表征湖泊生态系统中水华蓝藻的数量相对变化情况.本实验针对温度和光照对于水华蓝藻复苏的影响,利用野外泥样和水样在实验室内建立了湖泊生态系统模拟装置,在实验室内长期模拟了水华蓝藻的复苏过程,为进一步了解水华蓝藻春季复苏提供了实验依据,了解复苏周期内水华蓝藻由底泥复苏向水中迁移的基本规律.

## 1 材料与方 法

### 1.1 样品采集

2003年2月在太湖梅梁湾地区的采样点(位于31°26'20.2"N,120°12'01.4"E)用柱状采样器采集底泥样品,将最上层2cm泥柱切下,放入平皿中保持其表面完整带回实验室.同时取采样点水样带回实验室.

### 1.2 建立模拟装置

将采集的泥样置于直径5cm的自制圆形塑料托盘内,缓慢置入高40cm(Φ5cm)的模拟容器底部,保持底泥表面完整.沿容器内壁缓慢加入500ml预先经过Whatman GF/C滤纸(Φ1.2μm)过滤除藻的原湖水水样,注意避免搅动底泥表面.将装好泥样和水样的模拟装置外壁用铝箔包裹严密,定时取样,检测其中的藻类色素(叶绿素a,叶绿素b和藻蓝素)的含量变化,并以无底泥的同体积过滤湖水为对照.

### 1.3 实验室内模拟条件下复苏藻细胞的观察

将模拟装置静置在LRH-400-G II型光照培养箱(广东省医疗器械厂)内.设置培养箱内温度为25℃,光照强度为2000lux.由于容器外壁包裹了铝箔,因此光照只能从上部透入到水中,与自然状况基本一致.每两天吸取模拟装置内底层水样至BX41型显微镜(日本Olympus, DP12型数码照相机)下观察,检测是否有水华蓝藻细胞复苏进入水体中.

### 1.4 背景值测定

取平皿中剩余部分底泥和滤过水样使用荧光分光光度计(RF-5301PC, Sahimadzu 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(PC)的含量<sup>[13]</sup>.由于在模拟实验中,复苏过程中底泥和水体中的藻细胞数量少,很难用形态观察细胞计数来定量.荧光分析方法具有灵敏度较高,所需样品量少,简便快速的特点,对于在冬季蓝藻生物量很低的情况下探索蓝藻的存在是一种可行的检测方法<sup>[13]</sup>. Lee<sup>[14]</sup>认为,在所有可能发生光合作用的藻类中均能发现Chl. a的存在,而Chl. b只在绿藻和裸藻中

① 孔繁翔. 富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考及初步研究. “湖泊有毒藻类控制与生态修复”国际学术研讨会论文集. 2003.

含有,PC 只在蓝藻、红藻和隐藻中含有. 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,因此利用荧光分析方法测定的 Chl. a、Chl. b 和 PC 含量可以分别表征样品中藻类总量、绿藻数量和蓝藻数量. 由于绿藻与蓝藻在复苏最适温度上存在差异,藻蓝素与叶绿素的比值(PC/chlorophyll)表征蓝藻在藻类中所占的比例和蓝藻种群的相对优势,其中叶绿素含量等于叶绿素 a 含量与叶绿素 b 含量的总和.

### 1.5 温度与水华蓝藻复苏的关系实验

将模拟装置静置在培养箱内,培养初始温度为 5 ℃,黑暗培养 20 d,取出若干模拟装置测定泥样和水样中的色素<sup>[13]</sup>. 取样之后开始光照升温培养,光照强度为 2000 lux,光暗比 12:12. 将培养温度以每隔 5 d 上升 1℃的速度上升,其他培养条件不变. 在培养温度为 5 ℃、9 ℃、12 ℃、14 ℃、16 ℃、18 ℃、20 ℃的温度梯度定期取出若干模拟装置,测定其中泥样和水样中的色素. 用色素含量来表征泥样和水样中的藻浓度. 其中泥样水华蓝藻的变化以参数  $F$  表示  $F = N_t/N_0$ , 其中,  $N_t$  表示模拟试验中  $t$  时间取样时底泥中浮游植物数量;  $N_0$  表示模拟试验开始前底泥中浮游植物数量. 若  $F = 1$ ,说明经过模拟培养,泥样中藻类浓度没有发生变化;若  $F < 1$ ,说明经过模拟培养,泥样中藻类浓度减少,水样中藻类浓度可能上升,可能发生了藻类的复苏;若  $F > 1$ ,说明底泥中藻类增加.

## 2 结果与讨论

### 2.1 底泥中水华蓝藻复苏的细胞形态观察

在复苏试验开始前,从底泥样品中检测到微囊藻越冬细胞(图 1). 在室内模拟条件下复苏 15 d 后,从水样中检测到复苏微囊藻细胞(图 2). 由于模拟装置中的湖水预先经过过滤除藻,因此观察到的藻细胞必然是由底泥表面复苏进入水体中,证实了水华蓝藻复苏现象的存在. 吴生才<sup>[15]</sup>于 2002 年采集冬季底泥样品于实验室内培养,在水中同样镜检到复苏的微囊藻细胞. 李阔宇<sup>[9]</sup>等采集武汉东湖底泥于实验室内培养,在水中也检测到复苏的微囊藻细胞. 本实验观察发现与夏季水华中大量微囊藻细胞成团聚集在一起形成较大群体的形态不同,实验中检测到的越冬微囊藻细胞多以 2-8 个细胞聚成的小群体形态存在. 经显微测微尺测量,其细胞直径一般为 7.2-7.8 μm,大于夏季藻群体中的细胞直径(4.8-6 μm).



图 1 复苏实验前水华蓝藻细胞形态  
(铜绿微囊藻为例)(×600)

Fig. 1 *Microcystis aeruginosa* cell in the surface sediments before simulative recruitment

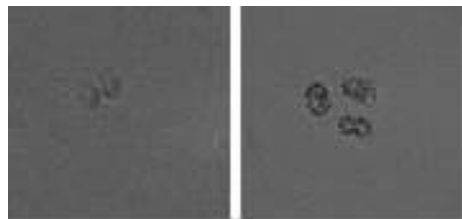


图 2 复苏 15 d 水柱中水华蓝藻细胞形态  
(铜绿微囊藻为例)(×600)

Fig. 2 *Microcystis aeruginosa* cells in the water column after 15 day's simulative recruitment

### 2.2 温度与水华蓝藻复苏的关系

2.2.1 复苏实验底泥中藻类数量变化 复苏实验底泥中的色素含量变化如图 3 所示. Chl. a、Chl. b 和 PC 含量可以分别表征样品中藻类总量、绿藻数量和蓝藻数量<sup>[13]</sup>. 绿藻数目和藻类总量的变化趋势相似,蓝藻数目的变化情况则明显不同. 温度由 5 ℃开始(太湖冬季底泥表面温度为 5 ℃左右),上升到 9 ℃时三种色素均略呈上升趋势,这说明藻类在温度升高和有光照的条件下逐渐恢复活性并开始缓慢生长. 这与 Reynolds<sup>[3]</sup>关于当水体温度达到 7-8 ℃时,微囊藻群体在底泥中开始缓慢生长的结论一致. 温度升至 14 ℃时,绿藻和总藻数量变化至背景值的 96% 和 103%,而蓝藻则基本不变;温度升至 16 ℃和 18 ℃时,Chl. a 和 Chl. b 呈相同的下降趋势,说明底泥中藻类在生长的同时,其减小的趋势应该是非蓝藻向水中迁移所造成的. 蓝藻则在 16 ℃时出现下降,可能此时有蓝藻进入水中;到 18 ℃呈现继续下降趋势,但幅度不大. 温度

由 18 °C 上升至 20 °C, 底泥中 Chl. a 浓度呈明显的上升趋势由背景值的 38 % 迅速上升至 76 %, Chl. b 也略有上升, 原因可能是由于温度升高底泥中藻类生长速度加快, 生长量大于其自底泥中释放的量, 也有可能是由于部分释放入水中的藻类发生下沉重新达到底泥表面. 蓝藻在 18 - 20 °C 温度区间出现了明显的下降趋势, 由背景值的 91 % 迅速降至 57 %, 说明随温度升高蓝藻复苏进入水中的速度大为增加.

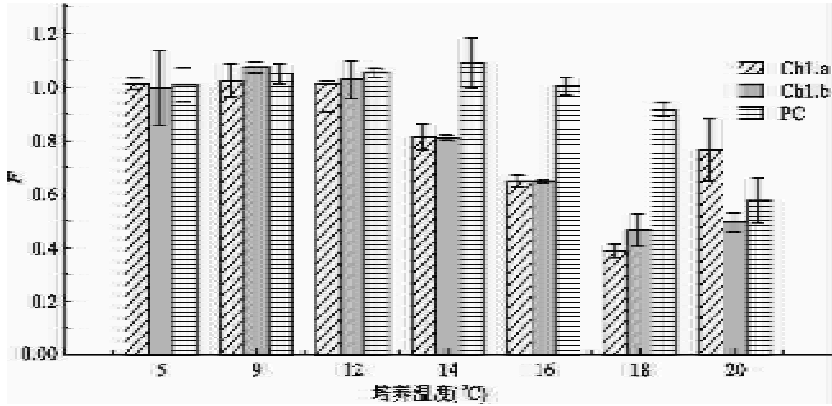


图 3 复苏实验底泥中的藻类数量比较值  $F$  变化(模拟值/背景值)

Fig. 3 Algal abundance in the surface sediments in the recruitment experiment

2.2.2 复苏实验水体中藻类数量变化 无底泥的过滤湖水对照组在实验期间未能检测到色素. 而在有底泥的装置中, 复苏实验水体中的色素含量变化如图 4 所示, 三种色素都呈现上升趋势, 但又不尽相同. 温度由 5 °C 上升至 9 °C, 水体中没有检测到藻类. 温度升至 12 °C, 水中出现了微量的 Chl. a 和 Chl. b 分别为 0.007  $\mu\text{g/L}$  和 0.002  $\mu\text{g/L}$ , 没有检测到 PC. 由于模拟装置中的湖水预先经过过滤除藻, 因此观察到的藻细胞主要是由底泥表面复苏进入水体中. 到 14 °C, 总藻数量和绿藻数量都有微量的增长, 同时检测到了微量的藻蓝素, 达到 0.003  $\mu\text{g/L}$ , 说明可能已有少量水华蓝藻复苏进入水体. 温度升至 16 °C、18 °C, 三种藻数量都有所增加, 但蓝藻增加幅度相对另两类小很多. 温度继续上升至 20 °C, 总藻数量和绿藻数量增幅减小, 蓝藻数量却大幅增加. 总藻数量和绿藻数量的最大增幅都出现在 18 °C, 最大比增长率分别为 91 %/d 和 64 %/d, 蓝藻数量的最大增幅则滞后于总藻数量和绿藻数量, 出现在 20 °C, 最大比增长率为 61.5 %/d. 随温度升高, 复苏藻类中蓝藻比例是先降低后升高, 在 18 °C 时达到最低值 0.030, 到 20 °C 时上升至最高值 0.164. 这可能是由于温度较低时绿藻以及其他非蓝藻藻类的上升使得 Chl. a 含量上升, 同时 PC 变化相对较小, 导致藻蓝素与叶绿素的比值下降. 温度上升到 20 °C 时以蓝藻的上升为主, PC 含量增加相对较快, 而绿藻等其他藻类生长缓慢, 导致藻蓝素与叶绿素的比值上升. Reynolds<sup>[3]</sup> 发现微囊藻群体在 15 °C 时, 生长速率增大, 并且开始少量地迁移至水体中. 李阔宇<sup>[9]</sup> 等实验发现, 温度在 15 °C 时, 底泥中微囊藻群体开始从底泥中释放进入水体, 在 20 °C 时大量释放进入水体, 这与本实验的结果基本一致. 而本实验则进一步确定了室内模拟条件下蓝藻复苏起始温度为 14 °C, 蓝藻复苏最适温度为 18 - 20 °C. Fallon<sup>[16]</sup> 等发现 Mendota 湖中底泥微囊藻生长所需最佳温度在 20 - 30 °C.

比较图 3 与图 4, 三种色素在复苏模拟实验的底泥中的变化与在水体中的变化有着对应的消长关系, 因此可以确认发生了藻类从底泥向水中迁移的复苏过程. 非蓝藻从底泥释放进入水中的过程主要发生于较低温度 (14 - 18 °C), 说明较低温度对于绿藻和硅藻有利; 而蓝藻释放进入水中的过程主要发生于较高温度 (18 - 20 °C), 说明较高温度对于蓝藻有利, 蓝藻的复苏相对非蓝藻的复苏滞后发生. 蓝藻数量占总藻数量的比例随温度上升先降低后升高也证明蓝藻更适应高温环境.

Tsujimura 等<sup>[4]</sup> 研究了日本琵琶湖沉积物中的微囊藻群体的季节变化, 结果呈现从冬季到初夏逐渐减少的趋势, 发现大部分微囊藻的浮力在六月初变化比较大, 这时的水温一般超过 20 °C. 藻类体内的碳水化合物因长期处于黑暗状态下而被消耗完毕, 且由于温度的升高而较少合成. 同时, 水温的升高也使得气囊

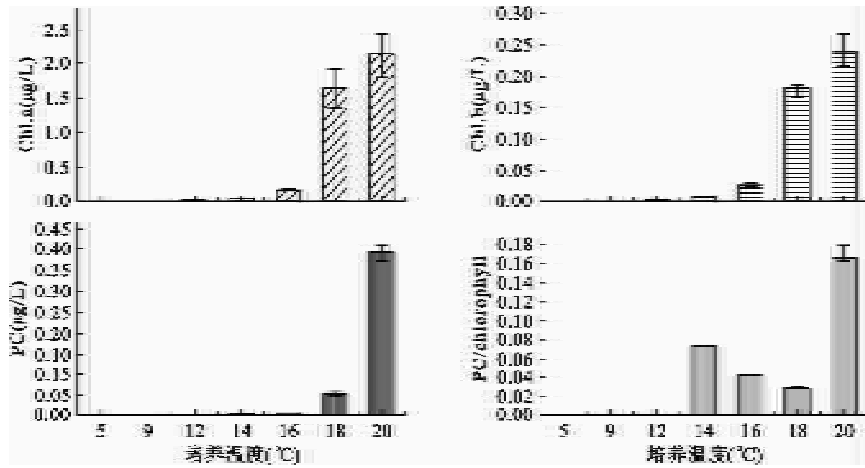


图4 复苏实验中水体藻类含量变化

Fig. 4 Algal abundance in the water column in the recruitment

增多,从而使藻类的浮力变化. 阎荣等研究了太湖梅梁湾底泥中的藻蓝素含量年变化规律,结果呈现从4月到9月逐渐减少的趋势,4月下降趋势最大,4月梅梁湾表层底泥平均温度为18.2℃<sup>①</sup>. 本次模拟复苏实验中底泥水华蓝藻在较低温度很少进入水中,而当温度上升至较高的18-20℃才开始大量释放进入水中,与前人的结论一致. 由此可以设想太湖水华蓝藻的浮力很可能在环境温度为18-20℃区间发生显著变化,使得水华蓝藻得以复苏进入水中.

本次模拟复苏实验采用的底泥是太湖冬季表层的2 cm底泥,由于冬季水华蓝藻主要集中在表层<sup>[15,16]</sup>,所以实验底泥中藻类的变化可以反映野外太湖底泥藻类的变化情况. 实验水样为经过滤的湖水,以保证水中检测到的藻类主要来源于底泥. 与前人采用人工培养基进行室内培养的方法相比,本实验更加接近自然状态,因此复苏过程不仅仅是培养状态下的生物学过程,而是与自然环境紧密结合的生态学过程. 本实验采用Chl. a、Chl. b和PC含量分别表征水体中藻类总量,绿藻数量和蓝藻数量<sup>[13,14]</sup>,实现对复苏藻类的定量检测. 然而,本次实验的模拟装置只是野外湖泊生态系统的简单模拟,与真实的原位条件有一定区别,即缺少风力、波浪、潮流等气象水文条件,而这些因素都会对藻类垂直方向的迁移产生影响,因此有可能在野外环境中潮流或波浪的扰动下,藻细胞在较室内实验更低的温度下就容易从底泥进入水体,在初步的野外观察中已经发现这一现象,这还需要进一步深入研究.

### 3 结论

本实验通过对太湖底泥蓝藻的复苏情况进行模拟研究,得出以下结论:

(1) 显微观察表明,水华蓝藻在室内模拟条件下的复苏时主要以2-8个细胞形成的小群体存在,其细胞直径为7.2-7.8 µm,大于夏季的藻细胞直径(4.8-6 µm).

(2) 太湖底泥水华蓝藻的复苏过程与环境温度变化密切相关. 蓝藻在环境温度达到14℃时少量进入水中,在环境温度升至18-20℃区间大量进入水中,为种群的大量暴发提供了必须的种源. 底泥蓝藻的复苏优势(18-20℃)晚于非蓝藻的复苏优势(14-18℃),高温对蓝藻复苏更为有利.

### 4 参考文献

- [1] Barbiero R P, Kann J. The importance of benthic recruitment to the population development of *Aphanizomenon flos-aquae* and internal loading in a shallow lake. *J Plankton Res*, 1994, **16**: 1581-1588.

① 阎 荣. 太湖水华蓝藻越冬和复苏的群落动态初步研究. 南京大学研究生毕业论文. 2004

- [2] Brunberg A K , Blomqvist P . Benthic overwintering of *Microcystis* colonies under different environmental conditions. *J Plankton Res* , 2002 , **24**: 1247 – 1252.
- [3] Reynolds C S . Growth and buoyancy of *Microcystis aeruginosa* K t z. Emend. Elenkin in a shallow eutrophic lake. *Proc R Soc Lond* , 1973 , **184**: 29 – 50.
- [4] Takamura N M , Yasuno M , Sugahara K . Overwintering of *Microcystis aeruginosa* Ktüz. in a shallow lake. *Plankton Res* , 1984 , **6**: 1019 – 1029.
- [5] Annika S D , Lars Anders H , Mikael G. Recruitment of resting stages may induce blooms of *Microcystis* at low N:P ratios. *J Plankton Res* , 2003 , **25**: 1099 – 1106.
- [6] Hansson L A , Rudstam L G , Johnson T B , *et al.* Patterns in algal recruitment from sediment to water in a dimictic , eutrophic lake. *Can J Fish Aquat Sci* , 1994 , **51**: 2825 – 2833.
- [7] Hansson L A . Algal recruitment from lake sediments in relation to grazing , sinking , and dominance patterns in the phytoplankton community. *Limnol Oceanogr* , 1996 , **41**: 1312 – 1323.
- [8] Trimbee A M , Harris G P . 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. *Plankton Res* , 1984 , **6**: 897 – 918.
- [9] 李阔宇,宋立荣,万 能. 底泥中微囊藻复苏和生长特性的研究. 水生生物学报, 2004, (3): 113 – 118.
- [10] Preston T , Steward W D P & Reynolds C S . Bloom forming cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* overwinters on sediment surface. *Nature* , 1980 , **288**: 365 – 367.
- [11] Barbiero R P , Welch E B . Contribution of benthic blue-green algal recruitment to lake populations and phosphorus translocation. *Freshwater Biol* , 1992 , **27**: 249 – 260.
- [12] Ceres O , Reynolds C S . Some effect of artificially-enhanced anoxia on the growth of *Microcystis aeruginosa* Ktüz. emend. Elenkin , with special reference to the initiation of its annual growth cycle in lakes. *Arch Hydrobiol* , 1984 , **99**: 379 – 397.
- [13] 阎 荣,孔繁翔,韩小波. 太湖底泥表层越冬藻类群落动态的荧光分析法初步研究. 湖泊科学, 2004, **16**(2): 163 – 167.
- [14] Lee R E . Phycology. 2nd edition. Cambridge, the United Kingdom: Cambridge University Press, 1989: 13 – 22.
- [15] 吴生才,陈伟民,高 光. 太湖冬季底泥中活体藻类的检测. 湖泊科学, 2003, **15**(4): 339 – 344.
- [16] Fallon R D & Brock T D . Overwintering of *Mirocystis* in Lake Mendota. *Freshwater Biol* , 1981 , **11**: 217 ~ 226.