

巢湖藻类生物量季节性变化特征

姜霞¹, 王书航¹, 钟立香¹, 金相灿¹, 孙世群²

(1. 中国环境科学研究院湖泊生态环境创新基地, 北京 100012; 2. 合肥工业大学资源与环境学院, 合肥 230009)

摘要:在2008年对巢湖浮游藻类的生态分布进行了为期1 a的调查研究, 并采用自制“藻类上浮/下沉捕集器”定量研究了水柱中藻类上浮和下沉速率的季节性变化。结果表明, 蓝藻为巢湖主要的水华优势群落, 但各个季节优势水华种群有所差别, 春季鱼腥藻占优势, 微囊藻次之; 夏、秋两季微囊藻占绝对优势。5月开始, 水柱中藻类生物量明显增加; 8月份达到最大值, 叶绿素含量全湖平均为 $146.37 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。表层沉积物中藻类生物量在 $9.75 \sim 16.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 最小值出现在夏季, 然后逐渐升高, 最大值出现在冬季的11月。研究期间(5~10月), 水柱中浮游藻类一直存在上浮和下沉现象, 上浮速率在总体上呈先上升后下降的趋势, 最大值出现在8月初, 为 $0.0368 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$; 下沉速率则呈现先上升后急剧下降的趋势, 最大值出现在9月初, 为 $0.0321 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 。多元逐步回归统计表明, 温度是巢湖藻类生物量变化最为显著的影响因子, 其次为总氮(TN)和总磷(TP)。

关键词:蓝藻; 藻类生物量; 沉积物; 藻类捕集器; 巢湖

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)09-2056-07

Seasonal Variation Characteristics of Algae Biomass in Chaohu Lake

JIANG Xia¹, WANG Shu-hang¹, ZHONG Li-xiang¹, JIN Xiang-can¹, SUN Shi-qun²

(1. Research Center for Lake Eco-Environment, Chinese Research Academy of Environment Sciences, Beijing 100012, China; 2. School of Resource and Environment, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The biomass and distribution of algae community in Chaohu Lake were investigated in 2008. At the same time, the seasonal variations of algae translocation between the sediment and overlying water were also quantitative studied by self-made “algae up/down trap”. Chaohu lake was dominated by Cyanobacteria all the year, and dominant Cyanobacteria species changed in different seasons. In spring, *Anabaena* was the dominant species, and *Microcystis* was the subdominant species; In the whole summer and autumn, the dominant species is *Microcystis*. Algae biomass increased significantly from May and the maximum appeared in August, was $146.37 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ with Chl-a. The value of algae biomass were $9.75 \sim 16.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in the surface sediments, and the minimum appeared in Summer, then the algae biomass increased gradually with the maximum value in winter. Translocation process between the sediment and the overlying water occurred throughout the study period. The recruitment rates increased at first with the maximum rates in early August, was $0.0368 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, and then had a downward tendency. However the sedimentation rates increased slowly firstly with the maximum rate in early September, then it decreased sharply, was $0.0321 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. Multiple stepwise regression showed that temperature was the most significant factor for the algae biomass in Chaohu Lake, Total nitrogen (TN) and Total phosphorus (TP) are sub-important factors.

Key words: Cyanobacteria; algae biomass; sediment; algae-trapper; Chaohu Lake

人类活动极大地改变了地球上碳、氮、磷的生物化学循环, 尤其是湖泊中氮、磷等营养负荷的增加, 导致浮游藻类大量生长, 水华大规模暴发^[1,2]。淡水湖泊常常发生以铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)为优势种群的水华, 并且有明显的季节性特点^[3]。铜绿微囊藻是一种具有气囊、能够释放藻毒素、可以分泌他感物质并且较其它浮游藻类具有较低生长率的淡水浮游藻类^[4,5], 之所以在较短时间内形成“水华”, 沉积物中的水华蓝藻复苏及其上升是关键因子之一^[6]。研究表明, 浮游藻类在秋季生长环境不利时, 下沉到沉积物表面, 并且在沉积物中保持相当长时间的活性; 春季, 除少部分会因为腐烂和分解损失外, 大部分表层沉积物中的藻类都有重新进入上

覆水体的能力, 到夏季而大量暴发^[7~9]。有研究显示冬季上覆水和沉积物中藻类对夏季水华暴发强度的影响显著^[10], 若冬季上覆水中没有藻类, 夏季水华藻类生物量将降低64%, 若冬季沉积物中没有藻类, 夏季水华藻类生物量将降低50%。用“N”示踪法发现, 在沉积物中过冬的藻类是夏季水华的暴发藻类之一^[11]。

目前国内针对浅水湖泊藻类动态变化的研究主要集中在复苏和生长特性方面^[12~15], 对水华藻类在水-沉积物界面上浮下沉过程的研究较为少见。本研

收稿日期: 2009-11-13; 修订日期: 2010-03-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(200507017)

作者简介: 姜霞(1974~), 女, 研究员, 主要研究方向为湖泊水环境, E-mail: jiangxia@craes.org.cn

究结合自制可独立且同时捕集湖水中上浮藻类和下沉藻类的“藻类上浮-下沉捕集器”(专利公开号:CN 101441206),定量研究了水-沉积物界面水华藻类上浮和下沉的动态变化及沉积物中藻类的季节性变化,探讨了环境因子对沉积物和上覆水体中藻类生物量的影响作用,以期进一步揭示蓝藻水华的暴发机制。

1 材料与方法

1.1 采样点选择

巢湖位于安徽省中部,江淮分水岭南侧,东经 $116^{\circ}24'30'' \sim 118^{\circ}00'00''$,北纬 $30^{\circ}58'40'' \sim 32^{\circ}06'00''$ 之间,湖面面积为 760 km^2 ,正常水文年平均水深 3 m 左右,最大水深约 7 m ,东湖水深 $3 \sim 4 \text{ m}$,西湖水深 2 m 左右,主要环湖河流有 9 条,分别为南淝河(店埠河)、十五里河、派河、柘皋河、双桥河、兆河、白石山河、裕溪河、杭埠河。共设置 12 个采样点,9 条河流入湖区各布设 1 个,东、西半湖湖心各布设 1 点各,东、西半湖分界线(忠庙)布设 1 个,见图 1。

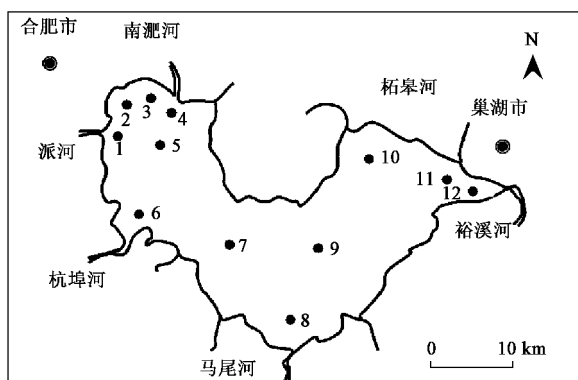


图 1 巢湖采样点布设示意

Fig. 1 Map of Chaohu Lake showing the sampling stations

“藻类上浮-下沉捕集器”分别设在 2 号、4 号、7 号采样点,其中 2 号采样点是合肥市备用水源地,4 号采样点是入湖河流污染最严重的河流南淝河入湖区,7 号采样点位于巢湖内最大岛姥山岛附近。

1.2 采样装置

用柱状采样器(04.23 BEEKER, Eijkelp, NL)采集表层 2 cm 的沉积物样品。“藻类上浮-下沉捕集器”有 2 个互相独立的上浮及下沉藻类收集系统组成,能够同时捕集上浮藻类及下沉藻类,主要组成部分有上浮收集柱、上浮收集漏斗、上浮收集瓶、下沉收集柱、下沉收集漏斗和下沉收集瓶。为了完整收集纵向迁移运动的藻类,同时避免沉积物表层的

悬浮作用影响,捕集器用浮漂-重锤系统固定,能够保证捕集器始终处于垂直状态,本实验将捕集器设置在距沉积物表层以上 60 cm 处。

1.3 样品采集及处理

“藻类上浮-下沉捕集器”采样从 5 月初开始,到 10 月结束,每月月初采样,在水华暴发强度较大的 7~9 月期间,每 2 周采样 1 次;水样采集(表层 50 cm 和底层 50 cm 混合)每月月初采样采集 1 次;柱状沉积物采集除 1 号、12 号外,每月采集 1 次,按 $0 \sim 2 \text{ cm}$ 、 $2 \sim 7 \text{ cm}$ 、 $7 \sim 12 \text{ cm}$ 间隔分 3 层,每个采样点采集 8 个平行样并现场混匀, 4°C 保存。取 2 mL 鲁戈试剂注入 195 mL 水样中,留待分析;另取 200 mL 水样,用孔径为 $1.2 \mu\text{m}$ GF/C (Whatman $\phi = 55 \text{ cm}$) 玻璃纤维膜抽滤,留待分析。现场测定上覆水温度(T)、透明度、溶解氧(DO)和 pH,水样采集后 24 h 内测定总氮(TN)和总磷(TP)。采集后的沉积物,取 100 g 立即进行冷冻干燥;另称取 100 g ,用 100 目筛初滤后,再用 25 号浮游藻类网过滤,收集浮游藻类网中的残留物,用蒸馏水洗涤,离心,去上清液,重复该操作 3~4 次,加入鲁戈试剂固定,留待定性分析。

1.4 样品分析

固定后水和沉积物中的藻类样品,用显微镜(Nikon E-1000, Japan)观察藻类的组成和数量;取 0.5 g 经冷冻干燥后的沉积物样品,加入 90% 的丙酮,置于 4°C 冰箱中萃取 24 h ,用同步荧光法^[12]测定叶绿素 a (Chl-a) 的含量;将水样过滤后的滤纸剪碎,放入细胞组织破碎器中,加入 90% 丙酮溶液 $3 \sim 4 \text{ mL}$,仔细研磨 $2 \sim 5 \text{ min}$ 后转移入具塞离心管内,于 4°C 黑暗中静置提取 12 h , $10\,000 \text{ r/min}$ 离心 $8 \sim 10 \text{ min}$,上清液过滤于 10 mL 容量瓶中,再向离心管中加入 90% 丙酮 $2 \sim 3 \text{ mL}$,离心,将离心所得的上清液过滤至容量瓶中,最后用 90% 丙酮定容至 10 mL ,用同步荧光法测定 Chl-a 的含量。水质参数的分析方法见文献[16]。

1.5 数据分析

试验中所有指标的测试均设置 3 个平行,平行样之间的误差 $< 5\%$ 。藻类上浮、下沉速率的测定公式^[10]为:

$$v = (\text{Chl-a} \times V) / (S \times t)$$

式中, v 为上浮或下沉速率, $\text{mg}/(\text{d} \cdot \text{m}^2)$; Chl-a 为收集瓶中 Chl-a 含量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; V 为收集瓶体积, m^3 ; S 为收集瓶横截面积, m^2 ; t 为采样时间, d 。

藻密度计算公式为:

$$C = (V_c \times n) / (V \times V_a)$$

式中, C 为藻密度, $\text{cells} \cdot \text{L}^{-1}$; V_c 为浓缩后体积, L ; V_a 为计数体积, L ; V 为采样体积, L ; n 为血球计数板中藻个数.

温度、透明度、pH、DO 等为全湖平均值; 西半湖和东半湖的 TN、TP 为各自区域采样点分析结果的平均值. 本研究以单位体积 Chl-a 含量的测定代替生物量的测定. 数据处理与分析采用 Excel 2003、Origin 8.0 以及 SPSS 16.0 软件.

2 结果与分析

2.1 上覆水水质参数季节性变化

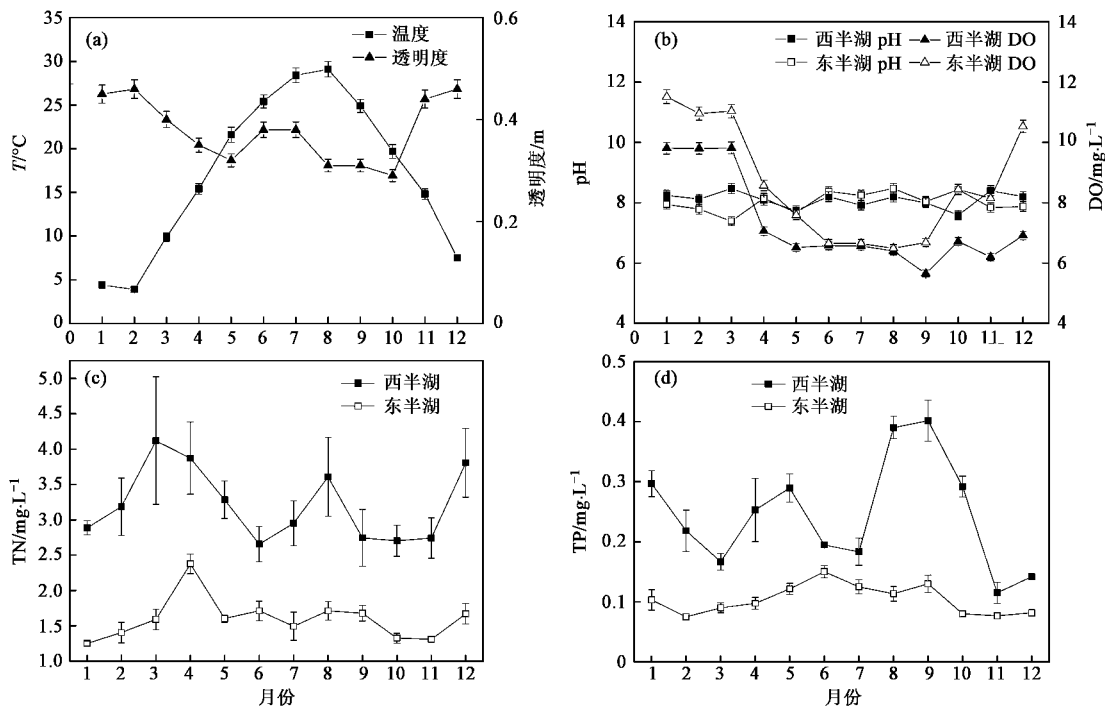


图2 巢湖水体理化性质的季节性变化

Fig.2 Seasonal variations of water quality parameters in Chaohu Lake

2.2 水柱中水华藻类生物量季节性变化

从时间上看, 水柱中藻类生物量有明显的季节性变化规律(图3). 冬末春初水柱中存有少量活体藻类, 如3月, 全湖 Chl-a 平均为 $6.9 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 从5月开始, 水柱中藻类生物量明显增加; 8月达到最大值, Chl-a 平均为 $146.37 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 然后在秋季开始下降.

从空间上看, 西半湖藻类生物量明显高于东半湖. 在水华暴发强度最大的8月, 西半湖藻类平均生物量是东半湖的 4.66 倍(图3). 在西半湖中, 2号采样点藻类生物量最大, 全年观测到 Chl-a 最大值为 $339.87 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 其次是3号采样点; 东半湖除了

水温全年在 $4.52 \sim 32.54^\circ\text{C}$ 之间[图2(a)], 其中表层水样在夏季稍高, 全湖没有出现水温垂直梯度变化; 透明度在 $0.29 \sim 0.46 \text{ m}$ 之间[图2(a)], 在藻类大量暴发的夏季和秋季仅为 0.3 m ; 湖水偏碱性, pH 一般在 $7.70 \sim 8.83$ 之间[图2(b)]; DO 季节性变化明显[图2(b)], 呈夏季低冬季高的趋势, 据测定, 夏季夜晚和早晨沉积物表面呈弱厌氧状态; 东、西半湖 TN 相差较大[图2(c)], 西半湖 TN 的浓度较高, 且西半湖 TN 从5月开始下降, 11月才明显升高, 而东半湖 TN 基本保持稳定; 西半湖 TP 也明显高于东半湖[图2(d)].

7号点外, 全年几乎没有水华暴发, 仅在8月有零星水华藻类分布.

2.3 沉积物中藻类生物量季节性变化

各采样点表层($0 \sim 2 \text{ cm}$) 沉积物中藻类生物量存在季节性变化[图4(a)、4(b)], 从1月到夏初巢湖沉积物中藻类生物量呈下降趋势, 然后开始升高, 最小值出现在6~7月之间, 最大值在11月左右, 其中8月沉积物中藻类生物量明显升高. 处于西半湖湖心的5号采样点, 表层沉积物中藻类生物量在12月达到最大, 为 $20.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 11号采样点表层沉积物中生物量从9月开始下降, 与其它各点相比为特殊. 各采样点中层($2 \sim 7 \text{ cm}$) 沉积物中藻类生

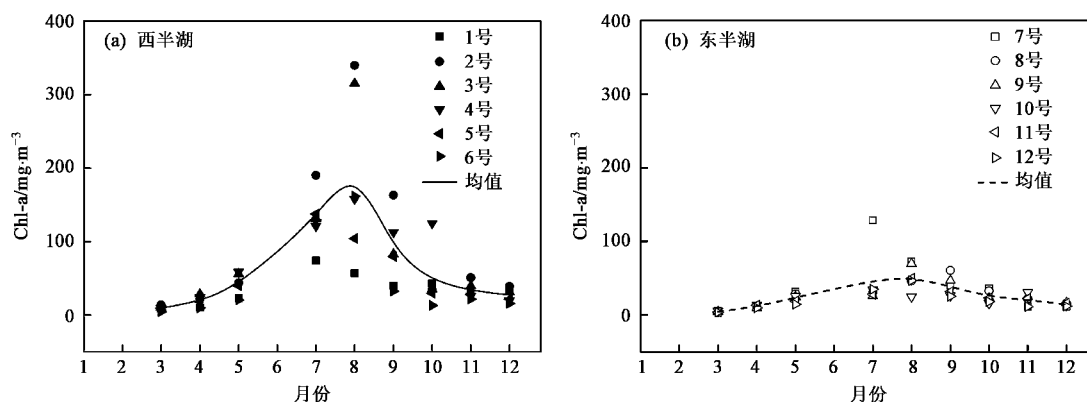


图3 巢湖东、西半湖水柱中藻类生物量季节性变化

Fig. 3 Seasonal variations of algae biomass in the water column of Chaohu Lake

物量季节性变化不明显[图4(c)、4(d)],在夏季稍有升高,秋季开始下降,但幅度较小.下层(7~12 cm)沉积物中藻类生物量极小.

东、西半湖表层沉积物中藻类生物量差别较大,

尤其在西半湖污染较为严重的区域,明显高于东半湖;同时可以看出,东半湖表层沉积物中藻类生物量季节性变化较西半湖不显著,夏季沉积物中藻类生物量增加不显著.

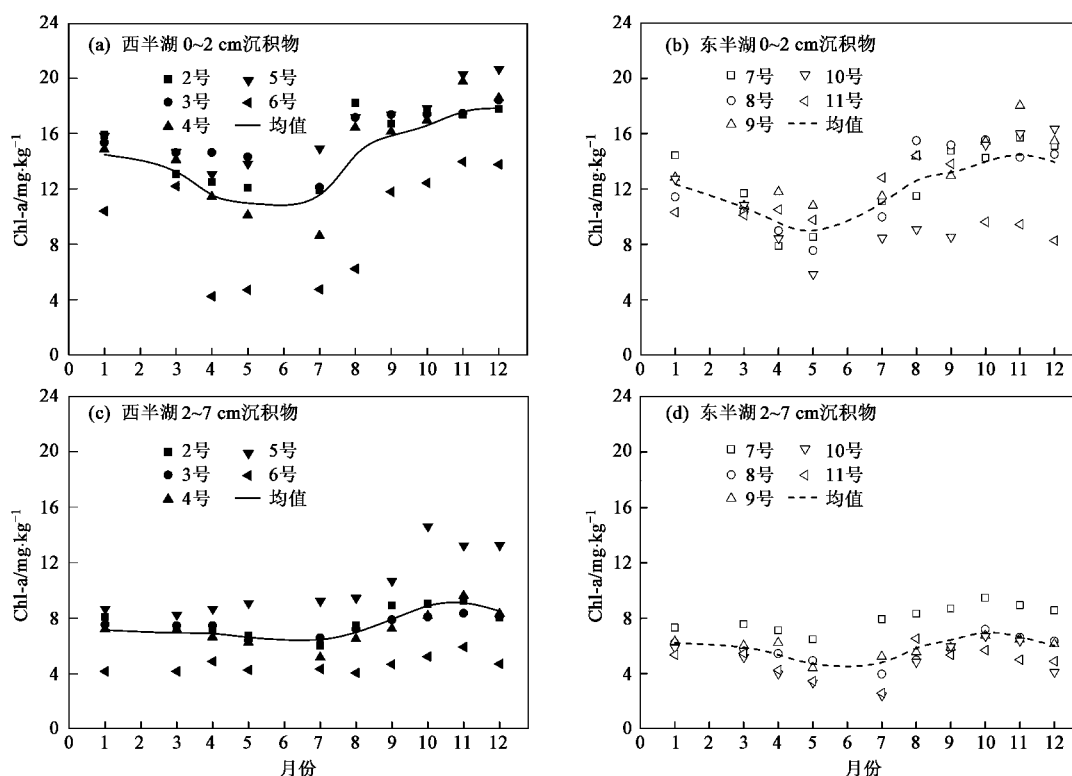


图4 巢湖东、西半湖不同深度沉积物中藻类生物量的季节性变化

Fig. 4 Seasonal variations of algae biomass in the different depth of sediment in Chaohu Lake

2.4 湖水中藻类上浮及下沉速率的季节性变化

研究期间(2008年5~10月),捕集器中藻类生物量存在明显变化(图5).藻类上浮速率在总体上

呈先上升后下降的趋势,最大值出现在8月,其中4号采样点上浮速率最大,2号次之,7号最小.藻类下沉速率呈先上升后急剧下降的趋势,最大值出

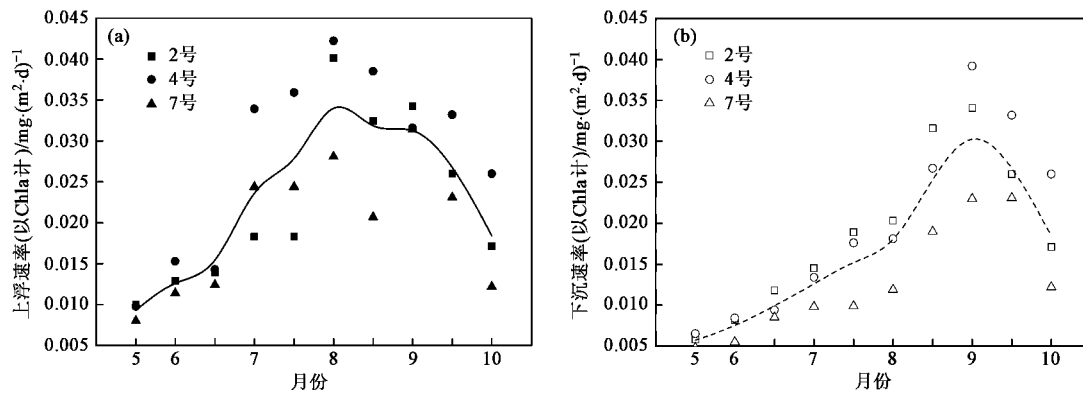


图5 湖水中藻类上浮速率和下沉速率的季节性变化

Fig. 5 Seasonal variations of recruitment and sedimentation velocity in the water column

现在9月初.从5月开始到下沉速率峰值出现的8月,2号采样点的下沉速率一直较大;但4号采样点下沉速率峰值最高,2号次之,7号最小.

2.5 水及沉积物中浮游藻类组成的季节性变化

试验期间,共从水柱样本中鉴定出43种浮游藻类,隶属5门39属,种类最多的是绿藻门,共21属23种,占藻类总数的53.48%;其次是蓝藻,共8属10种,占藻类总数的23.26%;第三是硅藻,共6属6种,约占13.95%;另外隐藻2属3种,裸藻1属1

种.从浮游藻类的密度来看,蓝藻是巢湖浮游藻类的最优势类群,其主要组成种类有群体的铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)、惠氏微囊藻(*Microcystis wesenbergii*)和丝状的水华鱼腥藻(*Anabaena flos-aquae*).常见种还包括隐球藻(*Aphanocapsa* sp.)、水华束丝藻(*Aphanizomenon flos-aquae*)、光辉色球藻(*Chroococcus* sp.).蓝藻优势种群密度的季节变化情况见表1.

蓝藻常年在水华藻类中占优势,尤其在夏、秋两

表1 水柱中微囊藻和鱼腥藻密度的季节性变化 $\times 10^5/\text{cells}\cdot\text{L}^{-1}$ Table 1 Seasonal variations of *Microcystis* and *Anabaena* in water column $\times 10^5/\text{cells}\cdot\text{L}^{-1}$

种类	春季(4月)			夏季(8月)			秋季(10月)			冬季(12月)		
	2号	4号	7号	2号	4号	7号	2号	4号	7号	2号	4号	7号
微囊藻 <i>Microcystis</i>	51.1	58.9	26.3	7959.8	4211.7	2084.7	1453.8	1663.1	514.0	199	222.5	76.6
鱼腥藻 <i>Anabaena</i>	130.4	130.6	50.4	97.0	13.6	43.8	6.4	3.7	4.4	65.4	130.1	35

季,蓝藻生物量几乎与浮游藻类总量相当.蓝藻中优势类群在不同季节表现出一定的差异,春季鱼腥藻占优势,微囊藻次之;夏、秋两季微囊藻占绝对优势,到了冬季又有鱼腥藻的出现,但微囊藻仍然占优势.

研究期间,表层沉积物存在大量的活体藻类,但物种多样性较低,而且微囊藻占绝对优势,说明西半湖沉积物已为严重富营养型.表层沉积物藻类种类的组成与巢湖湖水中的常见藻类相似,见表2.

表2 巢湖表层沉积物中藻类组成

Table 2 Algae composition of surface sediments in Chaohu Lake

采样点	种类组成	优势种
2号	微囊藻 <i>Microcystis</i> 、鱼腥藻 <i>Anabaena</i> 、颤藻 <i>Oscillatoriales</i> 、舟形藻 <i>Naviculaceae</i> 、小环藻 <i>Cyclotella</i> 、卵形隐藻 <i>Cryptomonas ovata</i>	铜绿微囊藻 <i>M. aeruginosa</i>
4号	微囊藻 <i>Microcystis</i> 、鱼腥藻 <i>Anabaena</i> 、颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i> 、颤藻 <i>Oscillatoriales</i>	铜绿微囊藻 <i>M. aeruginosa</i>
7号	微囊藻 <i>Microcystis</i> 、鱼腥藻 <i>Anabaena</i> 、颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i> 、颤藻 <i>Oscillatoriales</i>	铜绿微囊藻 <i>M. aeruginosa</i>

3 讨论

3.1 巢湖水体中藻类优势种群的竞争演替

湖泊水体中,往往出现某些优势种会随着季节而周期性交替变化.太湖春季以硅藻门为主,夏

季以蓝藻门的微囊藻为主,冬季以硅藻门和绿藻门为主^[17].而巢湖春季,绿藻和鱼腥藻开始出现并成为优势种;从夏季开始一直到秋末,微囊藻为优势种,且生物量较大;入冬前,鱼腥藻数量稍有增加,但微囊藻仍然占优势,同时出现大量硅藻.如

何解释巢湖水体中大量鱼腥藻的出现及种群演替现象? 研究表明, P 含量较高时, 螺旋鱼腥藻 (*Anabaena spiroides* Kleb.) 生长占优, P 含量较低时, 铜绿微囊藻 (*M. aeruginosa*) 占优势^[17]. 本研究中, 湖水中 TP 一直保持在富营养化水平以上 (>0.02), 因此, 磷不是巢湖藻类竞争演替的主导因素. 研究认为, 2001~2006 年间, 太湖湖水中平均 TN/TP 为 34.4, 巢湖仅有 11.7, 相差近 3 倍, 太湖以非固氮的微囊藻占绝对优势, 鱼腥藻很少出

现^[19], 而巢湖中出现大量固氮的鱼腥藻, 并在春末水华中占优势. 因此, 较低 TN/TP 值可能是巢湖水华鱼腥藻 (*A. flos-aquae*) 出现并在春末成为优势种的原因.

3.2 水体理化因子对藻类生物量的影响

水体理化因子对藻类的生长有着直接或间接的影响作用^[20,21], 同时藻类的生长又对环境因子有重要的反馈调节作用, 表 3 反映了巢湖水体一些理化因子和藻类生物量的线性相关关系.

表 3 巢湖理化因子与藻类生物量的线性相关矩阵¹⁾ ($n=100$)
Table 3 Correlation between algal biomass and some physical-chemical factors in Chaohu Lake ($n=100$)

	Chl-a	透明度	溶解氧	温度	总磷	Γ	pH	SChl-a ²⁾
Chl-a	1							
透明度	-0.19	1						
溶解氧	-0.43 **	0.05	1					
温度	0.49 **	-0.47 **	-0.68 **	1				
总磷	0.49 **	-0.16	-0.44 **	0.21 *	1			
Γ	0.35 **	0.23 *	-0.28 **	-0.073	0.47 **	1		
pH	0.03	0.30 **	-0.10	0.08	-0.10	0.17	1	
SChl-a	0.17	0.21 *	-0.17	-0.07	0.19	0.26 **	0.25 *	1

1) * 为显著相关 $p<0.05$; ** 为极显著相关 $p<0.01$ (双尾检验); 2) SChl-a: 表层沉积物中叶绿素 a 的含量

温度对巢湖藻类生物量变化有显著作用, 与水柱中藻类生物量呈极显著正相关, 但同沉积物表层中藻类生物量呈负相关. 研究表明, 温度是藻类在沉积物界面迁移的重要因素, 春季, 微囊藻在 15℃ 时生长开始加速并且迁移至水体中; 秋季, 环境不利时, 微囊藻下沉到沉积物的表面^[22]. Tsujimura 等^[23]研究了日本琵琶湖中微囊藻群体的季节性变化, 发现大部分微囊藻的浮力在 6 月变化大, 此时的水温一般超过 20℃. 也有研究认为, 湖水的物理和生物扰动引起沉积物的再悬浮是沉积物中藻类生物量变化的主要因素^[24]. 孔繁翔等^[25]提出了关于水华成因的假设: 将蓝藻水华的形成分为休眠、复苏、生物量增加和上浮并形成水华等 4 个阶段, 认为春季蓝藻复苏的主导因子为氧、营养盐、弱光, 而上浮阶段的主导因子为水文条件、气象因素. 本研究中, 沉积物中藻类生物量从 8 月起明显升高, 此时水柱中藻类生物量达到全年最大值, 同时观测到藻类上浮速率和下沉速率也显著增大, 因此可以初步推断出, 上覆水和沉积物之间存在频繁的藻类生物量交换活动, 而温度是交换作用的主导因素.

营养盐是藻类生长的重要影响因素, 大量研究结果揭示湖泊中氮、磷等营养盐对藻类生长的重要作用^[25]. 本研究中, Chl-a 与 TN 和 TP 呈显著正相

关, 主要因为藻类生长过程中吸收大量营养盐, 导致间隙水和上覆水之间营养盐浓度差增大而加速间隙水向上覆水释放, 同时夏季有机物的矿化作用会明显增加水体中营养盐含量. 巢湖沉积物中藻类生物量分布具有区域性, 西半湖靠近合肥的区域明显高于其它区域. 用各采样点表层沉积物中藻类生物量的最大值 (SChl-a_{max}) 对沉积物及上覆水中 TN、TP 和 Chl-a 的年均值作相关性分析得到: SChl-a_{max} 与上覆水中 Chl-a 呈较好的相关性 ($R=0.82, n=10, p<0.01$), 与沉积物及上覆水中 TP 相关性很差, 说明沉积物中藻类生物量与营养盐关系较小, 同时印证了上覆水与沉积物中藻类有大量交换. Chl-a 浓度与溶解氧 (DO) 之间存在明显负相关关系, 主要由于夏季温度较高, 使水及沉积物表层中有机物加速分解而消耗大量溶解氧的缘故.

在特定的水体中, 环境因子对藻类的影响作用各不相同, 同时各因子之间往往存在多重共线性, 直接建立藻类生物量与环境因子的线性回归模型, 可能给偏回归系数带来不合理的解释, 因此采用多元逐步回归统计筛选出相对重要的影响因子, 见表 4.

从表 4 中逐步回归方程可以看出, 水柱中 Chl-a 含量与水温的关系最为密切, 东、西半湖都以水温为最显著的因子, 而西半湖中 SD 亦进入回归方程, 说

表 4 藻类生物量与环境因子的逐步回归统计结果¹⁾

Table 4 Stepwise multiple regression between environmental factors and algae biomass in Chaohu Lake

位置	逐步回归方程	相关系数 <i>R</i>	<i>F</i> 值	德宾-沃森系数
西半湖	$\text{Chl-a} = 8.075 \times T + 361.27 \times \text{SD} - 229.37$	0.84	10.78	2.65
东半湖	$\text{Chl-a} = 1.47 \times T - 2.48$	0.83	21.23	1.48
全湖	$\text{Chl-a} = 3.61 \times T + 13.25 \times \text{TN} + 151.18 \times \text{TP} - 86.23$	0.67	25.80	1.63

1) Chl-a:叶绿素 a; *T*:温度; SD:透明度; TN: 总氮; TP:总磷

明西半湖藻类生物急剧增加可由透明度表现出. 全湖逐步回归方程筛选出 *T*、TN、TP 为影响藻类生物量变化的显著影响因子.

4 结论

(1)蓝藻常年在巢湖水华藻类中占优势,但优势种群在不同季节表现出一定的差异,春季鱼腥藻占优势,微囊藻次之;夏、秋两季微囊藻占绝对优势,到了冬季又有鱼腥藻出现,但微囊藻仍然占优势.

(2)表层沉积物中藻类生物量存在季节性变化,从 1 月到夏初呈下降趋势,然后开始升高,最小值出现在 6~7 月之间,最大值在 11 月左右.微囊藻为沉积物中藻类优势种,但物种多样性较低.

(3)研究期间(5~10 月),浮游藻类在水柱中一直存在上浮和下沉现象.藻类上浮速率在总体上呈先上升后下降的趋势,最大值出现在 8 月;下沉速率呈先上升后急剧下降的趋势,最大值出现在 9 月初.温度为影响水柱中藻类生物量变化最为显著的因子.

参考文献:

[1] Schlesinger W H. Biogeochemistry: An Analysis of Global Change [M]. San Diego: Academic Press, 1991.

[2] Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenko J, *et al.* Human Domination of Earth's Ecosystems [J]. Science, 1997, **277**: 494-499.

[3] 吴晓东,孔繁翔. 水华期间太湖梅梁湾微囊藻原位生长速率的测定[J]. 中国环境科学,2008,**28**(6): 552-555.

[4] Walsby A E, Kinsman R, George K I. The measurement of gas vesicle volume and buoyant density in planktonic bacteria [J]. Journal of Microbiology Methods, 1992, **15**: 293-309.

[5] Walsby A E. Gas vesicles[J]. Microbiol Research, 1994, **58**:94-101.

[6] 张晓峰,孔繁翔,曹焕生,等. 太湖梅梁湾水华蓝藻复苏过程的研究[J]. 应用生态学报,2005,**16**(7):1346-1350.

[7] Reynolds C S. The Ecology of Freshwater Phytoplankton [M]. New York: Cambridge University Press, 1984.384.

[8] Boström B, Petterson A K, Ahlgren I. Seasonal dynamics of a cyanobacteria-dominated microbial community in surface sediments of a shallow, eutrophic lake [J]. Aquatic Sciences, 1989, **51**:153-178.

[9] Brunberg A K, Blomqvist P. Benthic overwintering of *Microcystis*

colonies under different environmental conditions [J]. Plankton Research, 2002,**24**:1247-1252.

[10] Jolanda M H, Eveline O F M, Petra M, *et al.* Benthic-pelagic coupling in the population dynamics of the harmful cyanobacterium *Microcystis* [J]. Freshwater Biology, 2005, **50**: 854-867.

[11] Preston T, Stewart W D P, Reynolds C S. Bloom-forming cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* overwinters on sediment surface [J]. Nature, 1980, **288**:365-367.

[12] 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[J]. 湖泊科学, 2004,**16**(2):163-168.

[13] 李阔宇,宋立荣,万能. 底泥中微囊藻复苏和生长特性的研究[J]. 水生生物学报,2004,**28**(2):113-118.

[14] 吴晓东,孔繁翔,张晓峰,等. 太湖与巢湖水华蓝藻越冬和春季复苏的初步研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(5):1313-1318.

[15] 颜润润,逢勇,陈晓峰,等. 不同风等级扰动对贫富营养下铜绿微囊藻生长的影响[J]. 环境科学,2008,**29**(10):2749-2753.

[16] 金相灿,屠清英. 湖泊富营养化调查规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社,1990.101-110.

[17] 胡小贞,金相灿,储昭升,等. 太湖铜绿微囊藻与四尾栅藻的光竞争及模拟优势过程初探[J]. 农业环境科学学报, 2005, **24**(3): 538-54.

[18] 朱伟,万蕾,赵联芳. 不同温度和营养盐质量浓度条件下藻类的种间竞争规律[J]. 生态环境, 2008,**17**(1):6-10.

[19] 谢平. 翻阅巢湖的历史[M]. 北京: 科学出版社, 2009. 116-125.

[20] 王书航,姜霞,钟立香,等. 巢湖沉积物不同形态氮季节性赋存特征[J]. 环境科学,2010,**31**(4):946-953.

[21] Giordani G, Zaldivar J M, Viaroli P. Simple tools for assessing water quality and trophic status in transitional water ecosystems [J]. Ecological Indicators, 2009,**9**:982-991.

[22] Reynolds C S. Growth and buoyancy of *Microcystis aeruginosa* Kütz. emend. Elenkin in a shallow eutrophic lake [J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 1973, **184**: 29-50.

[23] Tsujimura S, Tsukada H, Nakahara H, *et al.* Seasonal variations of *Microcystis* populations in sediments of lake Biwa, Japan[J]. Hydrobiologia, 2000, **434**:183-192.

[24] Verspagen J M H, Snelder E O F M, Visser P M, *et al.* Recruitment of benthic *Microcystis* (cyanophyceae) to the water column: internal buoyancy changes or resuspension? [J]. Journal of Phycology, 2004, **40**: 260-270.

[25] 孔繁翔,高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. 生态学报,2005,**25**(3):589-594.