

太湖与巢湖水华蓝藻越冬和春季复苏的比较研究

吴晓东^{1,2}, 孔繁翔^{1*}, 张晓峰^{1,2}, 曾庆飞^{1,2}, 季健^{1,2}, 钱善勤^{1,2}

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 研究了太湖、巢湖水华蓝藻的越冬和春季复苏的动力学特征. 结果表明, 太湖从秋季 11 月时蓝藻大量下沉进入底泥越冬, 到次年 5 月后底泥中的蓝藻开始复苏进入水体. 在 11 月 ~ 次年 5 月的越冬过程中, 底泥中的蓝藻保持增长, 其中在 3 ~ 5 月蓝藻生长加快. 巢湖中蓝藻表现出类似的下沉越冬和春季复苏规律, 即蓝藻自 11 月开始下沉, 但巢湖底泥中的蓝藻在 3 ~ 4 月时即开始复苏. 本研究表明太湖和巢湖中蓝藻都有明显的下沉越冬和春季复苏现象. 太湖不同营养盐湖区蓝藻的越冬和复苏规律相似, 底泥中的蓝藻数量在越冬过程中相差不大, 说明越冬期间底泥中蓝藻含量与夏季水体中蓝藻数量可能没有直接联系.

关键词: 太湖; 巢湖; 蓝藻; 越冬; 复苏

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)05-1313-06

Comparison of Overwintering and Rrecruitment of Cyanobacteria in Taihu Lake and Chaohu Lake

WU Xiao-dong^{1,2}, KONG Fan-xiang¹, ZHANG Xiao-feng^{1,2}, ZENG Qing-fei^{1,2}, JI Jian^{1,2}, QIAN Shan-qin^{1,2}

(1. State Key laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Dynamics of overwintering and recruitment of cyanobacteria were studied in Taihu Lake and Chaohu Lake. The results demonstrated that cyanobacteria sank to the sediment in autumn (November) and recruited to water column in May in Taihu Lake. From November to next May, the cyanobacteria kept growing with an increased growth rate from March to May in the sediment. A similar pattern of overwintering and recruitment of cyanobacteria was found in Chaohu Lake, which showed the cyanobacteria sinking in November and recruitment in spring with the cyanobacteria growing in the sediment, while the cyanobacteria recruited to water column from March to April. Our results showed there was typical overwintering and recruitment of cyanobacteria in Taihu Lake and Chaohu Lake. The numbers of cyanobacteria in sediment represented by the almost same pigments content in different lake areas of Taihu Lake according to nutrient levels probably implied the little relationships of the numbers in sediments with the summer bloomed biomass of cyanobacteria.

Key words: Taihu Lake; Chaohu Lake; cyanobacteria; overwintering; recruitment

蓝藻水华已经成为当前最严重的水环境问题之一. 蓝藻的越冬以及复苏可能是夏季水华发生的重要机理之一. 越冬过程中, 一些丝状蓝藻, 如 *Anabaena* 和 *Aphanizomenon* 等可以产生休眠孢子并在适宜的条件下萌发形成新的个体^[1,2], 另外一些藻类如蓝藻门的 *Gomphosphaeria* 和近年来频繁引起水华的微囊藻 (*Microcystis*) 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^[3,4]. 这些藻类在底泥中长期存活, 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. 通常复苏是指藻类从底泥沉积物中上升到水体中的过程, 但是也有学者认为复苏包括了藻类在底泥中的生长和从底泥上升进入水体的整个过程^[5~7].

微囊藻不产生孢子, 而是在冬季大量下沉到沉积物表面越冬, 虽然其中一些会死亡分解, 但相当大的一部分会在春季复苏上浮进入水体. 影响蓝藻复苏的因素很多, 例如光照^[8]、溶氧^[9]、营养盐^[10]、温

度以及水流^[11]等. 关于复苏的生态学意义, 多数研究倾向于认为复苏的藻类在数量并不足以形成水华, 但可能是水华发生的种源, 从而与水体中夏季水华有着密切的关系^[6,12].

太湖和巢湖均为我国长江中下游重要的浅水湖泊, 近年来夏季都频繁发生蓝藻水华. 其中巢湖营养水平较太湖高, 水华也更为严重, 而太湖的具体湖区中营养水平和蓝藻数量也有差异. 目前对蓝藻水华形成机理的研究主要集中于夏季^[13], 而对于蓝藻越冬复苏这一过程认识较少. 因此, 为研究太湖和巢湖水体中蓝藻越冬复苏过程, 从而更好地理解蓝藻水华的发生机理, 本研究通过对水体和底泥中的色素

收稿日期: 2007-05-24; 修订日期: 2007-08-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40471045); 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2002CB412305); 中国科学院资源环境领域野外台站研究基金项目; 中国科学院百人计划项目

作者简介: 吴晓东 (1981 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为湖泊环境, E-mail: wxd565@163.com

* 通讯联系人, E-mail: fvkong@niglas.ac.cn

进行分析,即用叶绿素 a(Chl-a)表征总藻类含量,叶绿素 b(Chl-b)表征蓝藻以外藻类的群落水平,藻蓝素(PC)表征蓝藻的含量,PC/Chl-a 的比值用来反映蓝藻占全部藻类的优势水平^[14],探讨了太湖不同湖区和巢湖的蓝藻越冬和复苏过程,分析了复苏与夏季对应湖区/湖泊水华程度的关系.

1 材料与方法

1.1 采样点

根据太湖不同湖区的营养盐和夏季藻类含量差

异,在太湖设 4 个不同采样点,分别为湖心(31°20′59.8″N, 120°11′16.7″E)、梅梁湾(31°25′53.8″N, 120°12′42.5″E)、马山(31°27′54.7″N, 120°09′00.6″E)和鼋头渚(31°30′20.9″N, 120°11′34.8″E),依次编号 1、2、3、4,采样点位置如图 1(a)所示.

巢湖近年来大部分湖区呈超富营养水平,夏季蓝藻水华严重.采样点选择在夏季蓝藻易发的湖区,其经纬度为31°35′46″N, 117°24′21″E,编号为 1,如图 1(b)所示.

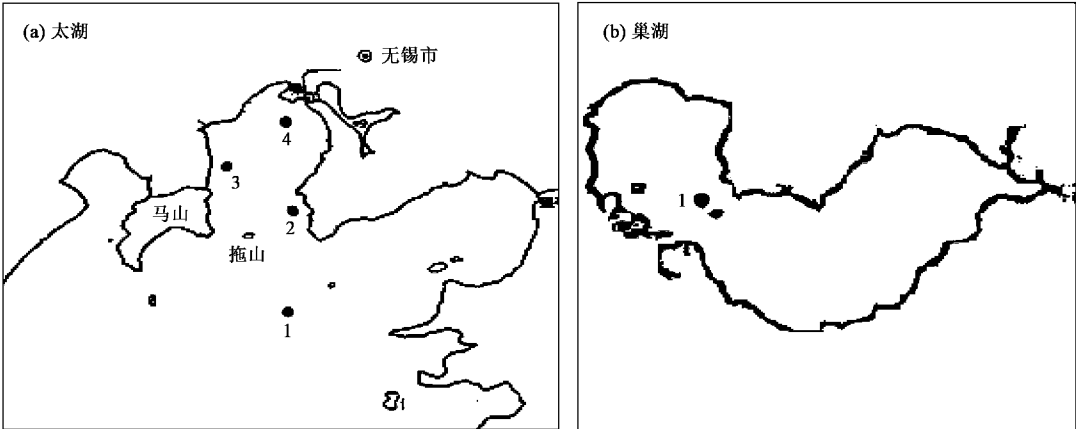


图 1 太湖、巢湖采样点示意
Fig.1 Sampling sites in Taihu Lake and Chaohu Lake

1.2 采样方法和时间

2003 年 9 月~2004 年 8 月,每月(缺 12 月数据)中旬(10~15 日之间)在太湖不同采样点采集水样.根据巢湖水体中藻类含量的情况,于 2005 年 11 月~2006 年 4 月,每月下旬(20~25 日之间)在巢湖分层采样.每次同时用柱状采泥器采底泥,切取最上层 2 cm 左右厚度的表层底泥,低温保存带回实验室.每次采样时用多参数水质仪 YSI6600(Yellow Spring Instruments, USA)记录水质参数.

1.3 样品分析和数据处理

水样和底泥的处理分析见文献[15],即分别用丙酮和 Tris-HCl 提叶绿素和藻蓝素,用荧光法分析^[14, 15].实验中每个样品作 3 次重复,所得数据用 SPSS 软件包分析.

2 结果与分析

2.1 太湖不同湖区水体和底泥中色素的变化情况

2.1.1 采样期间太湖水体理化性质

采样期间太湖各采样点 pH 在 7.42~8.19 之间

变动,溶氧(DO)含量在 7.79~11.25 mg/L 之间.水温在 1 月最低,仅 2.94℃,但是在 3 月份以后迅速上升,在 4 月份时已接近 20℃.

2.1.2 太湖混合水体中色素含量变化情况

实验分析了太湖不同湖区混合水体中 Chl-a、Chl-b 和 PC 的含量,不同湖区水体中色素含量表现出类似规律.图 2 为梅梁湾 2003 年 9 月~2004 年 8 月色素含量测定结果,PC 含量自 2003 年起开始下降,直至 2004 年 5 月始终保持较低水平,至 6 月起

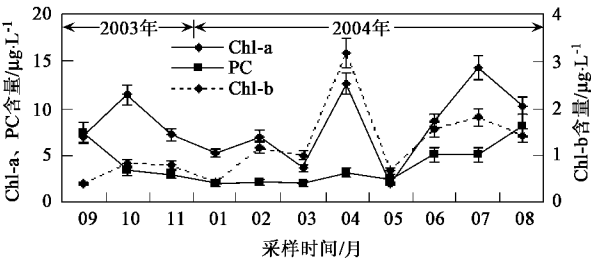


图 2 太湖梅梁湾水体中的色素含量
Fig.2 Pigments concentrations of water column
in Meiliang Bay, Taihu

持续增加,到 8、9 月份水体中 PC 含量最高,说明蓝藻自 5 月以后持续增加. Chl-a 除 4 月份含量明显上升外,总体表现与 PC 呈相似规律,说明 4 月份时期其他藻(如绿藻和硅藻)含量较高.

2.1.3 太湖不同湖区底泥中的色素变化

如图 3 所示,太湖不同营养水平的 4 个湖区中底泥中的 Chl-a[图 3(a)]和 Chl-b[图 3(b)]的含量和营养盐水平相关,湖心区含量最低而鼋头渚含量最高,而 PC[图 3(c)]的含量水平大致相当.不同湖区

底泥中 Chl-a 和 Chl-b 在 2003 年 9 月~2004 年 4 月这一阶段保持较稳定水平并在 5 月份开始迅速下降,说明从秋季到春季的过程中各种藻类在水体中数量比较稳定. PC 水平自 2003 年 9 月~2004 年 4 月保持增加趋势,在 4~5 月达到最大值,说明底泥中的蓝藻自秋季开始数量持续增加,并在 4 月和 5 月到达最高峰.通过底泥中色素含量的变化可知,底泥中的蓝藻和其他藻类均在 5 月份左右大量进入水体或由于分解而减少.

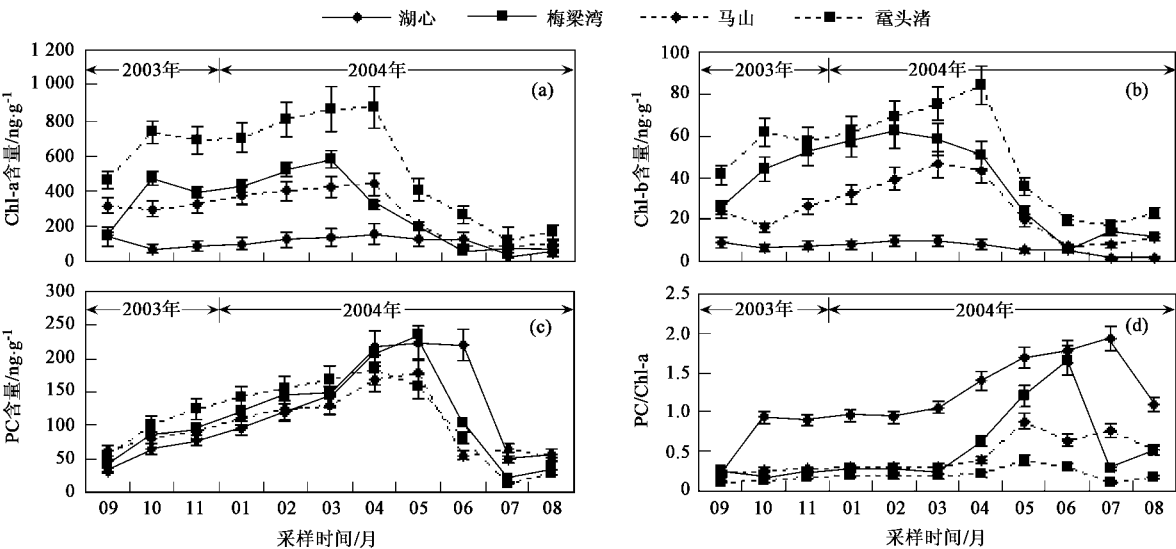


图 3 不同时间太湖不同湖区底泥色素含量变化

Fig.3 Variation of sediment pigments in different lake areas with sample time

PC/Chl-a 比值的变化表明从 3~4 月开始,各个湖区的蓝藻所占比例上升并维持在较高水平,说明此阶段底泥中蓝藻优势的确立[图 3(d)],即在此期间蓝藻生长速度较其他藻快.湖心地区底泥中的蓝藻占藻类总数比例最大,则可能是由于湖心地区藻种类相对单一,蓝藻在数量上占较大优势.

2.1.4 太湖不同湖区上覆水与水柱中色素含量比例变化

上覆水中的 Chl-a[图 4(a)]和 PC[图 4(c)]与整水柱中色素的比例在 11 月~次年 1 月都较高,说明在此阶段蓝藻多分布于水体下层,上覆水中 Chl-b 在整水柱中含量的比例在不同湖区的变化差异较大,但是对比 Chl-a 的比例变化规律,则发现二者呈相反趋势,说明其他藻类在水体中与蓝藻可能存在竞争性分布.在 PC 比例的分布方面,湖心区域在 4~7 月较高[图 4(c)],这可能是由于采样过程中湖心区域水体受到较大的扰动,从而引起藻类的分布

差异.

上覆水中 PC 和 Chl-a 比值在 4 月份较低,但是 5 月迅速升高并达到最大.结合图 2 的结果说明 4 月非蓝藻的藻类含量高.5 月的 PC/Chl-a 值最高,说明 5 月份蓝藻增长加快并在水体中所占比例加大.

2.2 巢湖水体和底泥中的色素含量变化

2.2.1 采样期间巢湖水体理化性质

采样过程中,巢湖水体的 pH、溶氧(DO)都与太湖类似,对复苏影响较大的水温也与太湖相近,即 1 月最低(3.06℃),至 4 月时迅速升高至 20℃左右.

2.2.2 巢湖水体色素含量的变化

巢湖蓝藻水华较太湖更为严重,图 5 所示为巢湖水体中的色素含量.在 2005 年 11 月整水柱水样中 Chl-a 和 PC 含量在 60 μg/L 左右,到 2006 年 4 月水体中 Chla 和 PC 含量升高至 100 μg/L,远高于太湖水体中的含量,但是 Chl-b 的含量和太湖相差不大,说明巢湖和太湖水体中非蓝藻的其他藻类含量相当.

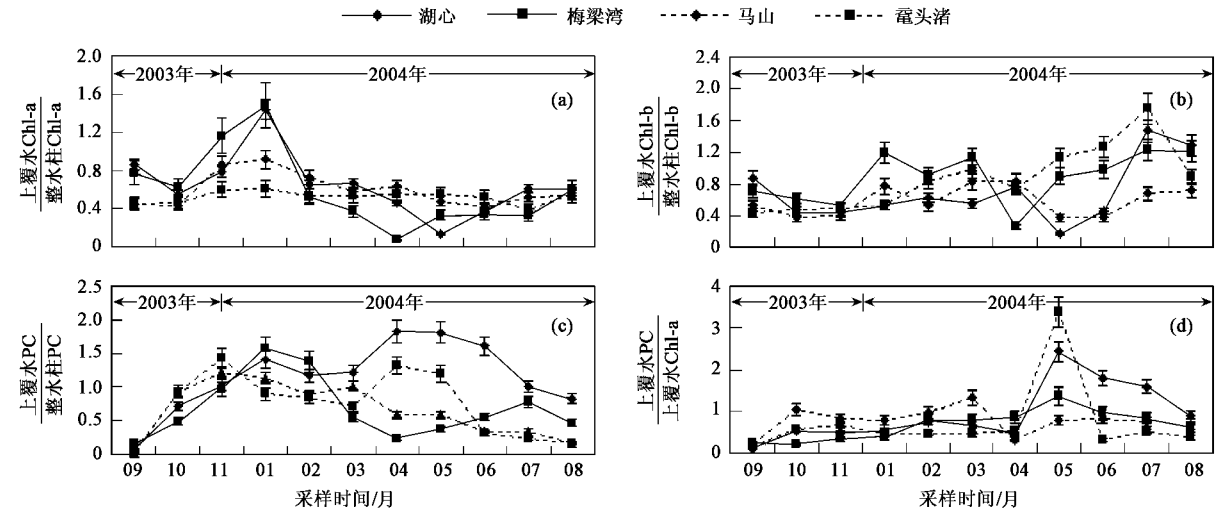


图 4 太湖上覆水与整水柱的色素比例及上覆水中 PC 与 Chl-a 之比

Fig.4 Ratio of pigments of overlying water to water column and the ratio of PC/Chl-a of overlying water

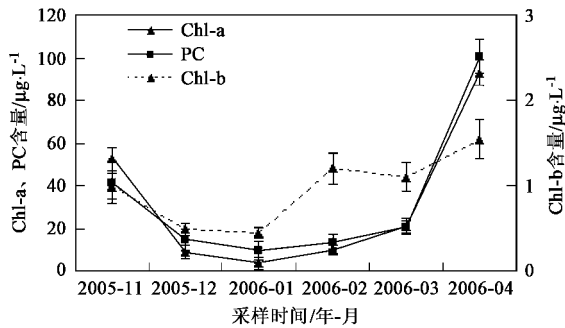
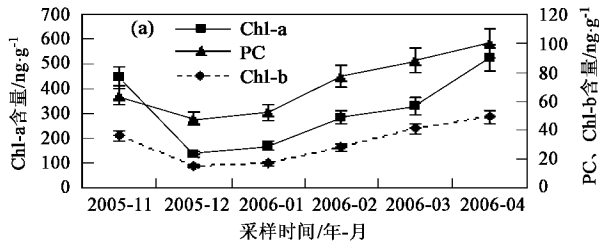


图 5 巢湖水体中色素含量

Fig.5 Variation of pigments of the water column in Chaohu Lake



2.2.3 巢湖底泥中色素含量变化

巢湖底泥中的色素变化结果见图 6. 越冬过程中,底泥中各色素呈增加趋势[图 6 (a)],说明越冬过程中持续有藻类由水体进入底泥或者底泥中的藻类保持生长. PC/Chl-a 值在 12 月达到最大值[图 6 (b)],说明此时底泥中蓝藻所占比例最大,由于底泥中藻类含量都在增加,12 月以后的 4 个月中 PC/Chl-a 的降低表明底泥中非蓝藻的浮游植物增加较蓝藻要快.

2.2.4 巢湖底泥与水体中色素含量比例的变化

如图 7(a)所示,巢湖上覆水 Chl-a、PC 与整水柱

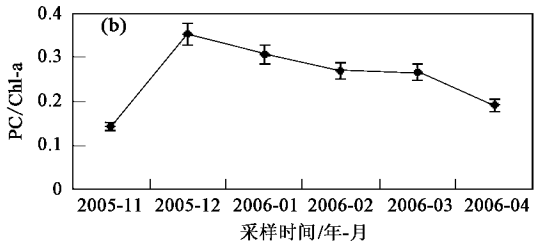


图 6 不同时间巢湖底泥中色素含量和 PC/Chl-a 的变化

Fig.6 Variation of sediment pigments and values of PC/Chl-a of Chaohu Lake with sample time

中的色素比例在 11 月份较高,由于此时水体中仍以蓝藻为主,上覆水中色素比例增加说明蓝藻开始大量下沉.12 月时上覆水中色素相对含量下降,反映了这一阶段中水体中大量的蓝藻死亡、分解的过程.自 12 月以后上覆水相对于水柱中的 PC 含量保持升高趋势,至 4 月开始下降,这可能说明 3 月时蓝藻已经开始复苏,并在 4 月份进入到水体中上层.整个越

冬过程中 Chl-b 的比例相对稳定,说明其他藻类在上覆水和整水柱中的分布上差异不大. PC/Chl-a 值的变化趋势[图 7(b)]可以发现自 11 月~次年 2 月期间上覆水体中蓝藻相对比例逐渐增加,而到 3、4 月时相对含量又开始下降,这可能与巢湖水体中 3、4 月份含有大量的硅藻等其他藻类,此时蓝藻虽然也较多,但是蓝藻已多分布于水体中上层相关.

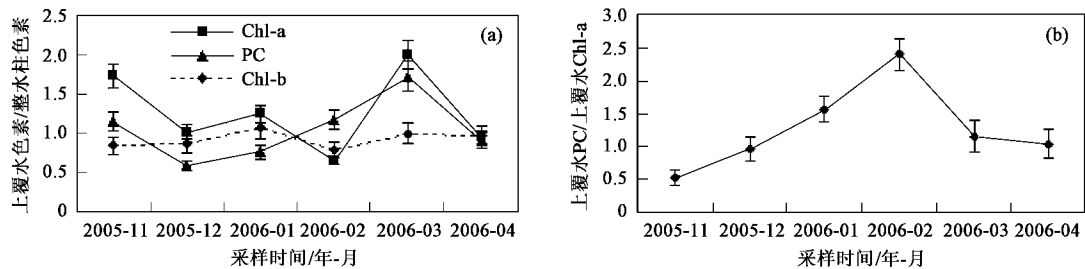


图7 巢湖上覆水色素与整水柱的色素比例及上覆水中 PC/Chl-a

Fig.7 Ratios of pigments of overlying water to water column and PC to Chl-a of overlying water in Chaohu Lake

通过分析底泥与上覆水色素含量的变化趋势,可知巢湖水体中的蓝藻在 11 月开始下沉,3 月时即开始大量复苏.在越冬过程中,底泥中的蓝藻和其他藻类数量都保持增加趋势.底泥中蓝藻的最大优势出现在 12 月,而上覆水中出现在 2 月,这可能由于巢湖水体中冬季含有其他藻类从而影响了蓝藻的优势水平.

3 讨论

目前还不清楚底泥中蓝藻在越冬期间的状态,但有研究认为野外水体中温度的升高,底泥表面的低光强和缺氧环境会引起蓝藻生长^[16].根据上覆水中色素含量占整水柱中色素含量的比例变化,本研究发现在太湖的不同湖区和巢湖中,蓝藻自秋季 10 月或 11 月左右开始下沉进入底泥,并且在温度开始升高的 3 月或 4 月即开始在底泥中增长加快,与 Reynolds^[17]的研究相符.对瑞典同一湖泊不同深度湖区的研究也发现底泥中的蓝藻在 2~3 月期间有上升现象^[4].蓝藻复苏的最佳温度在 20℃ 左右^[18],太湖不同湖区和巢湖底泥中的 PC 含量在温度升高的 4 或 5 月时大量进入水体.复苏期间,太湖和巢湖底泥中蓝藻的数量减少,这与相关的报道一致^[19].但也有研究发现湖泊底泥中的蓝藻数量在秋季到冬季期间逐渐减少^[20],这可能是由于该湖泊底泥中藻类消耗分解作用较强,而太湖和巢湖属于浅水湖泊,冬季水体温度较低,可能使得底泥中藻类分解缓慢;另外,太湖和巢湖在冬季易受强烈扰动,这可能导致部分藻类在水体和底泥中频繁发生交换,从而导致底泥中藻类的数量没有出现相应的减少现象.太湖不同湖区底泥中蓝藻在 4~5 月时生长加快并取得优势,但是越冬期间巢湖水体中含有大量的硅藻、绿藻和蓝藻^[21],这可能导致巢湖底泥和水体中蓝藻优势水平和出现时间上与太湖不一致.总体而言,不同的湖泊中藻类的种类和数量,水体和底泥的理化环

境不同,因而底泥中藻类的聚集、分解以及生长速率也会有所差异,本实验表明太湖不同湖区和巢湖底泥蓝藻在越冬过程中数量保持增加.

对几种色素的分析不能在种属水平上反映浮游植物的数量,但由于近年来巢湖和太湖夏季都频繁发生以微囊藻为主的蓝藻水华,因此可以根据色素大致判断太湖和巢湖水体中蓝藻的越冬复苏过程.本实验表明太湖不同湖区的蓝藻越冬复苏都遵从在秋季(11 月)时开始下沉,随后在温度升高的 4 月或 5 月左右开始复苏,由底泥大量进入水体,但是太湖各个营养盐不同的湖区底泥中的蓝藻优势水平,底泥中蓝藻完全进入水体的具体时间上有所差异.巢湖水体中蓝藻在 11 月开始下沉,而且在越冬过程中底泥中的色素含量保持增长趋势,这与太湖相似.巢湖在 4 月下旬采样时水体中已经有大量微囊藻,说明巢湖的蓝藻复苏时间要比太湖提前 1 个月左右,可能在 3~4 月初就已经开始.当然,由于本研究对太湖和巢湖的研究并不是在同一年进行,因此太湖和巢湖蓝藻复苏开始时间差异的具体原因还有待于进一步研究.

值得注意的是,巢湖底泥中色素含量明显高于太湖底泥中的含量,这与巢湖和太湖夏季水华程度的关系是否存在必然联系还不清楚,但是在太湖的 4 个湖区中,底泥中 Chl-a 含量和营养盐浓度相关,而底泥中 PC 的含量差异不大,这可能说明在太湖不同湖区中底泥复苏的蓝藻与水体中的蓝藻数量没有直接关系.

4 结论

(1)太湖和巢湖中蓝藻都表现出类似的下沉越冬和春季复苏的规律,在具体的复苏时间以及特定时间蓝藻的优势水平方面,巢湖和太湖甚至太湖不同湖区中存在一定差异.

(2)在越冬过程中,底泥中的蓝藻数量保持

增长.

(3)太湖不同营养盐湖区底泥中的蓝藻数量在越冬过程中相差不大,说明越冬期间底泥中蓝藻含量与夏季水体中蓝藻数量可能没有直接联系,底泥中复苏的蓝藻对水体中夏季蓝藻水华的发生可能仅起“种源”作用.

参考文献:

[1] Annika S D, Lars-Anders H. Effect of bioturbation on recruitment of algal cells from the “seed bank” of lake sediments[J]. *Limnology Oceanography*, 2002, **47**: 1836-1843.

[2] Paerl H W. Nuisance phytoplankton blooms in coastal estuarine and inland waters[J]. *Limnology Oceanography*, 1998, **33**: 823-847.

[3] Barbiero R P, Welch E B. Contribution of benthic blue-green algal recruitment to lake populations and phosphorus translocation[J]. *Freshwater Biology*, 1992, **27**: 249-260.

[4] Brunberg A K, Blomqvist P. Benthic overwintering of microcystis colonies under different environmental conditions[J]. *Journal of Plankton Research*, 2002, **24**: 1247-1252.

[5] Hansson L A. Algal recruitment from lake sediments in relation to grazing, sinking and dominance patterns in the phytoplankton community[J]. *Limnology Oceanography*, 1996, **41**: 1312-1323.

[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[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1994, **51**: 2825-2828.

[7] 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]. *Journal of Plankton Research*, 1994, **16**: 1581-1588.

[8] Van Dok W, Hart B T. Akinete germination in *Anabaena circinalis* (Cyanophyta) [J]. *Journal of Phycology*, 1997, **33**: 12-17.

[9] Barbiero R P. A contribution to the life history of the planktonic cyanophyte, *Gloeotrichia echinulata* [J]. *Archiv für Hydrobiologie*, 1993, **127**: 87-100.

[10] Stahl-Delbanco A, Hansson L A, Gylistrom M. Recruitment of

resting stages may induce blooms of *Microcystis* at low N: P ratios [J]. *Journal of Plankton Research*, 2003, **25**: 1099-1106.

[11] Roberts R D, Zohary T. Temperature effects on photosynthetic capacity, respiration, and growth rates of bloom-forming cyanobacteria[J]. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 1987, **21**: 391-399.

[12] Tsujimura S, Tsukada H, Nakahara H, *et al.* Seasonal variations of *Microcystis* populations in sediments of lake Biwa[J]. *Japanese Hydrobiologia*, 2000, **434**: 1183-1192.

[13] 白晓华,胡维平,胡志新,等. 2004 年夏季太湖梅梁湾席状漂浮水华风力漂移入湾量计算[J]. *环境科学*, 2005, **26**(6): 57-60.

[14] Cao H, Kong F, Tan J, *et al.* Recruitment of total phytoplankton, chlorophyte and cyanobacteria from lake sediments recorded by photosynthetic pigments in a large, shallow lake (Lake Taihu, China) [J]. *International Review of Hydrobiology*, 2005, **90**: 347-357.

[15] 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**: 163-168.

[16] Caeres O, Reynolds C S. 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 [J]. *Archiv für Hydrobiologie*, 1984, **99**: 379-397.

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

[18] 李阔宁,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, **3**: 113 ~ 118.

[19] 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.

[20] Takamura N, Yasuno M, Sugahara K. Overwintering of *Microcystis aeruginosa* Kütz. in a shallow lake [J]. *Journal of Plankton Research*, 1984, **6**: 1019-1029.

[21] 吴晓东,孔繁翔,曹焕生,等. 越冬浮游植物光合作用活性的原位研究[J]. *湖泊科学*, 2007, **19**: 139 ~ 146.