

# 抚仙湖叶绿素 a 的生态分布特征

刘镇盛<sup>1,2</sup>, 王春生<sup>1,2</sup>, 倪建宇<sup>1,2</sup>, 朱根海<sup>1</sup>, 周怀阳<sup>3</sup>

(1. 国家海洋局 第二海洋研究所, 杭州 310012; 2. 国家海洋局 海底科学重点实验室, 杭州 310012; 3. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640)

**摘要:** 2001 年 5 月、8 月和 9 月, 对云南抚仙湖水体、沉积物、沉积物与水界面的叶绿素 a, 浮游植物的优势种类、细胞密度的分布和时空变化及其与环境因子的关系进行了研究。采用分光光度法测定叶绿素 a 浓度。结果表明, 水体叶绿素 a 浓度的分布存在着明显的季节变化, 真光层中的动态变化尤其显著, 且光照强度对水体中叶绿素 a 浓度的分布起主导作用。在观测的 3 个不同季节中, 表层叶绿素 a 浓度, 秋季最高, 平均为  $(2.27 \pm 0.12) \mu\text{g}/\text{dm}^3$ ; 春季次之, 为  $(1.85 \pm 0.20) \mu\text{g}/\text{dm}^3$ ; 夏季最低, 为  $(1.38 \pm 0.15) \mu\text{g}/\text{dm}^3$ 。分析水体中营养元素的分布特征及其与叶绿素 a 之间的关系, 表明磷是抚仙湖浮游植物生长的主要限制因子。沉积物叶绿素 a 浓度的垂直分布存在明显差异, 其浓度在表层和次表层较高, 并随沉积深度的增加而降低; 浮游植物的分析表明, 硅藻门的小环藻是抚仙湖沉积物中叶绿素 a 的主要来源。而上覆水中叶绿素 a 浓度与真光层叶绿素 a 浓度相当的原因, 则可能是由水底微型藻类的再悬浮和浮游植物的沉降聚集而导致的。

**关键词:** 叶绿素 a; 浮游植物; 生态分布; 抚仙湖

## Ecological distribution characteristics of chlorophyll a in Fuxian Lake

LIU Zhen-Sheng<sup>1,2</sup>, WANG Chun-Sheng<sup>1,2</sup>, NI Jian-Yu<sup>1,2</sup>, ZHU Gen-Hai<sup>1</sup>, ZHOU Huai-Yang<sup>3</sup> (1. Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China; 2. Key Laboratory of Submarine Geosciences of State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China; 3. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(9): 1773~1780.

**Abstract:** The investigations on chlorophyll a of the water body, sediment, sediment-water interface were carried out in Fuxian Lake of Yunnan Province from May to September 2001. We have also analyzed the distribution of dominant species and cell density of phytoplankton, the spatial and temporal variation of chlorophyll a and its relationship with environmental factors. Chlorophyll a was extracted and measured

---

基金项目: 中国大洋矿产资源研究开发协会专项基金资助项目(DY95-06-08, DY105-02-01)

收稿日期: 2003-01-02; 修订日期: 2003-05-20

作者简介: 刘镇盛(1960~), 男, 广东潮阳市人, 副研究员, 主要从事海洋生态学和环境生物学研究。E-mail: Zhenshliu@yahoo.com.cn

参加此项工作的还有梁楚进、王方国、张美、刘小涯、杨俊毅等。美国路易斯安那大学(Louisiana University) Liu Hongbin 博士协助修改本文的英文摘要, 在此一并表示感谢。

**Foundation item:** China Ocean Mineral Resources Exploration and Development Special Foundation (No. Dy95-06-08, Dy105-02-01)

**Received date:** 2003-01-02; **Accepted date:** 2003-05-20

**Biography:** LIU Zhen-Sheng, Associate researcher, Major research marine ecology and biology. E-mail: Zhenshliu@yahoo.com.cn

according to procedures of UNESCO's spectrometer methods under 750nm, 664nm, 647nm, and 630nm wavelengths. Dissolved oxygen and nutrient data were supplied by the chemical working group of the research project. The results obtained show that there was seasonal variation of chlorophyll a concentrations in the water column, especially in the euphotic zone. The light intensity is one of the primary controlling factors of chlorophyll a distribution in the water. The highest chlorophyll a concentrations of the surface water occurred in autumn, with an average of  $(2.27 \pm 0.12)\mu\text{g}/\text{dm}^3$ , while the lowest chlorophyll a concentrations appeared in summer with an average of  $(1.38 \pm 0.15)\mu\text{g}/\text{dm}^3$ . The concentration of chlorophyll a in spring was  $(1.85 \pm 0.20)\mu\text{g}/\text{dm}^3$ , higher than that in summer. Considering the distribution of the nutrients and their correlation with the chlorophyll a, it is evident that the phosphate was the major limitation factor of phytoplankton growth in Fuxian Lake. Moreover, there was markedly variation of the chlorophyll a in the different depth of lake sediment. Benthic chlorophyll a concentrations were high in the surface and subsurface, and decreased with increasing sediment depth. Based on the phytoplankton analysis, we suggest that the *Cyclotella bodanica* is the major source of chlorophyll a in sediments. The average chlorophyll a concentration was  $(1.45 \pm 0.42)\mu\text{g}/\text{dm}^3$  at the sediment-water interface, which was similar to the concentration of the euphotic zone. High chlorophyll a concentration at sediment-water interface was possibly due to the suspension of benthic microalgae and the accumulation of sinking phytoplankton.

**Key words:**chlorophyll a; phytoplankton; distribution; Fuxian Lake

文章编号:1000-0933(2003)09-1773-08 中图分类号:Q178.1 文献标识码:A

抚仙湖是我国著名淡水湖之一,位于云南高原中部的澄江盆地,其地理位置为 $24^{\circ}21' \sim 24^{\circ}28'N$ , $102^{\circ}49' \sim 102^{\circ}58'E$ ,湖面海拔1721m,湖区四面环山,沿湖有尖山河、路居河、东大河、西大河、梁王河等20多条溪流汇入湖中。抚仙湖湖泊面积约 $212\text{km}^2$ ,水深平均约89.6m,为我国第二深水湖泊<sup>[1]</sup>。20世纪80年代以来,在抚仙湖已进行过一些研究工作<sup>[2,3]</sup>,然而,关于抚仙湖沉积物叶绿素a、沉积物与水界面叶绿素a的研究仍为空白。本文首次报道抚仙湖水体、沉积物与水界面、沉积物叶绿素a浓度的生态分布特征和变化规律,并探讨其与环境的关系,同时阐明浮游植物细胞丰度和优势种类的分布特征及季节变化,为抚仙湖环境资源的可持续利用和发展提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 采样

2001年5月26日至27日(春季)、8月14日(夏季)和9月13日至19日(秋季),在云南抚仙湖布设6个观测站(图1),对抚仙湖水体和沉积物的叶绿素a、浮游植物、营养盐、及其它理化因子等进行4个航次的观测研究。叶绿素a、浮游植物和化学营养盐观测所需水样,用QCC<sub>2-3</sub>型采水器,按0m、10m、20m、50m、100m和底层采集,另从每层样品中取 $500\text{cm}^3$ 水样装入塑料瓶中,加入 $10\text{cm}^3$ 的中性福尔马林溶液固定保存,供浮游植物种类鉴定和细胞计数。沉积物叶绿素a分析所需样品,用 $\phi 90\text{mm} \times 620\text{mm}$ 有机玻璃多管取样器采集,垂直取样深度约为25~35cm,柱状沉积物按0~1、1~2、2~3、3~4、4~5、5~6、6~7、7~8、8~9、9~10cm的间隔切断分层,每层子样称量2g左右的泥样,测定叶绿素a浓度。

### 1.2 分析方法

叶绿素a的测定采用分光光度法。从每层水样中,量取 $1.0\text{dm}^3$ ,立即用whatman GF/F滤膜进行减压过滤,抽滤压力小于30kPa,为控制叶绿素降解作用,过滤前,先加入 $1\text{cm}^3$ 浓度为2%的MgCO<sub>3</sub>悬浊液,将截留浮游植物的滤膜置于萃取管内,加 $10\text{cm}^3$ 体积分数为90%的丙酮溶液低温(2℃)黑暗萃取20h,提取期间摇荡样品3~4次以充分萃取。样品经离心后用7230G分光光度计在750nm、664nm、647nm和630nm波段~~进行测~~测。沉积物叶绿素a测定的程序:将已称重的沉积物样品,加 $4.0\text{cm}^3$ 体积分数为90%的丙酮溶液研磨,经萃取、离心、定容后,用7230G分光光度计测定。从多管取样器上覆水中,用虹吸法采集

离沉积物表面1~20cm的水样,测定沉积物与水界面的叶绿素a浓度,依照海洋调查规范<sup>[4]</sup>和湖泊生态调查观测与分析<sup>[5]</sup>的方法及有关计算公式,计算水体和沉积物的叶绿素a浓度。溶解氧和营养盐的测定数据由本项目的化学专题组提供。浮游植物细胞计数和种类鉴定,按湖泊生态调查观测与分析<sup>[5]</sup>等方法,用Olympus万用显微镜在实验室进行。

## 2 结果

### 2.1 水体叶绿素a浓度的分布和时空变化

5月(春季),表层叶绿素a浓度平均为 $1.85 \pm 0.20 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ ,最高值出现在W<sub>1-5</sub>站( $2.11 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ ),最低值出现于W<sub>1-6</sub>站( $1.65 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ );10m层,叶绿素a浓度变化在 $1.31 \sim 2.00 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ ;20m层,叶绿素a浓度变化在 $0.98 \sim 1.82 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ 。从水深20m以下,叶绿素a浓度呈明显梯度下降(表1、图2a)。

8月份(夏季),抚仙湖雨量增多,光照时间减少,表层叶绿素a浓度下降,其变化范围在 $1.23 \sim 1.53 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ ;10m层,叶绿素a浓度变化在 $1.14 \sim 2.08 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ 。叶绿素a的垂直分布特征与5月的相似,从表层往底层,叶绿素a浓度逐渐下降,底层叶绿素a浓度变化在 $0.12 \sim 0.22 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ ,表层叶绿素a比底层的高6倍以上(表1、图2b)。

9月13日(秋季),水体叶绿素a浓度明显高于5月份和8月份,表层叶绿素a浓度的变化在 $1.60 \sim 2.20 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ 。

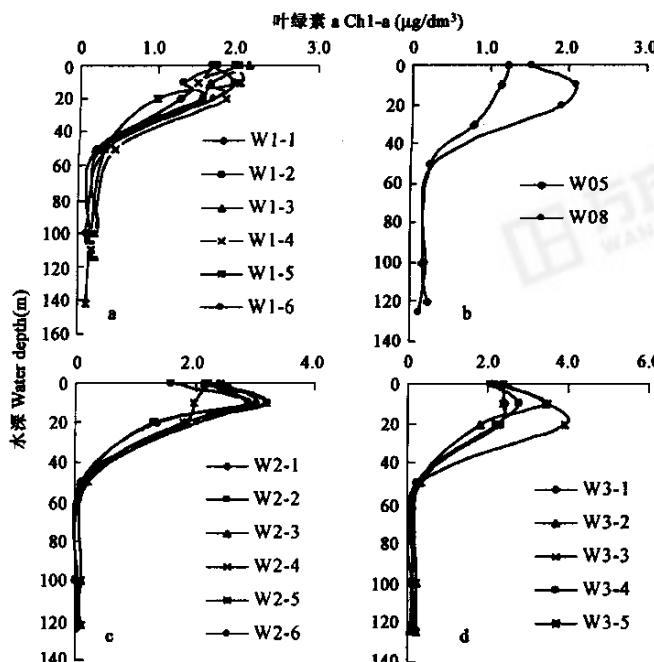


图2 叶绿素a浓度( $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ )垂直分布(2001年)

Fig. 2 Vertical distribution of Chlorophyll a concentrations (2001)

(a) 5月26日 May 26; (b) 8月14日 Aug. 14; (c) 9月13日 Sept. 13; (d) 9月18日 Sept. 18

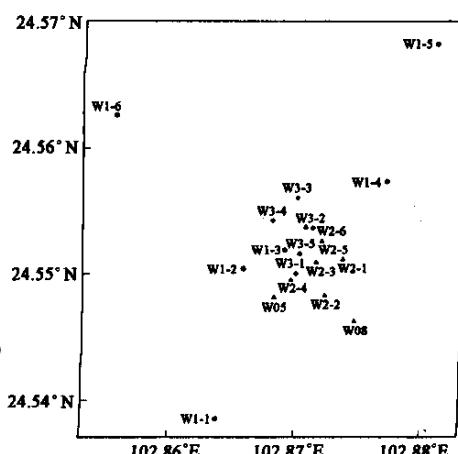


图1 抚仙湖调查站位分布图(2001年)

Fig. 1 Investigation station in Fuxian Lake (2001)

2.43  $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ , 最高浓度出现在 W<sub>2-4</sub> 站 (2.43  $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ ); 10m 层, 是水柱中叶绿素 a 浓度最高的水层, 平均值为 (2.86 ± 0.45)  $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ , 最高浓度达 3.21  $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ , 出现在 W<sub>2-6</sub> 站, 变化范围在 1.99 ~ 3.21  $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ ; 20m 层, 叶绿素 a 浓度变化为 1.32 ~ 2.05  $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ 。在 20m 层以下, 叶绿素 a 浓度显著下降, 底层叶绿素 a 浓度变化在 0.06 ~ 0.11  $\mu\text{g}/\text{dm}^3$  (表 1、图 2c)。

9月18日(秋季), 表层叶绿素 a 浓度变化在 2.09 ~ 2.37  $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ , 分布相对均匀; 10m 层, 叶绿素 a 浓度平均值达 (2.89 ± 0.53)  $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ , 是 3 个不同季度月中浓度最高的水层, 最高浓度出现在 W<sub>3-5</sub> 站, 为 3.48  $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ ; 20m 层, 叶绿素 a 浓度变化范围在 1.80 ~ 3.92  $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ , 最高浓度也出现在 W<sub>3-5</sub> 站 (3.92  $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ ), 该值也是 3 个季度月中出现的最高值。底层叶绿素 a 浓度变化在 0.05 ~ 0.21  $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ , 仅相当于表层的 7% 左右(表 1、图 2d)。

## 2.2 沉积物与水界面的叶绿素 a 浓度

2001年9月, 在观测区内, 选择 6 个沉积物柱状样, 当多管取样器采集沉积物出水至船甲板后, 立即采用虹吸法收集上覆水, 测定叶绿素 a 浓度。结果表明, 沉积物与水界面的叶绿素 a 浓度与真光层中的叶绿素 a 浓度相近, 叶绿素 a 浓度平均为 (1.45 ± 0.42)  $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ , 其变化范围在 1.03 ~ 2.14  $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ 。

## 2.3 沉积物叶绿素 a 浓度的分布及变化

5月26日(春季), 沉积物表层(0~1cm)叶绿素 a 浓度平均为 (9.75 ± 5.19)  $\mu\text{g}/\text{g}$  湿重(以下简称  $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 最高值为 17.86  $\mu\text{g}/\text{g}$ , 出现于 W<sub>1-5</sub> 站, 最低值为 4.43  $\mu\text{g}/\text{g}$ , 出现于 W<sub>1-3</sub> 站。

9月13日(秋季), 在测定 W<sub>2-1</sub> 站的沉积物叶绿素 a 浓度中, 将沉积物按 0.0 ~ 1.0cm、1.0 ~ 2.0cm、2.0 ~ 4.0cm、4.0 ~ 6.0cm 分 4 层进行分析, 结果表明, 表层 (0.0 ~ 1.0cm) 沉积物叶绿素 a 浓度最高, 达 12.14  $\mu\text{g}/\text{g}$ , 随沉积深度的增加, 叶绿素 a 浓度明显下降, 4.0 ~ 6.0cm 层, 叶绿素 a 浓度仅为 2.63  $\mu\text{g}/\text{g}$  (图 3a)。

9月18日(秋季), 为了更深入地研究沉积物叶绿素 a 浓度的垂直分布特征, 增加沉积物取样分析的深度和分隔样品的层次, 将沉积物柱状样, 按 1cm 作为分隔单位, 从表层到 10cm 层, 分 10 层测定叶绿素 a 浓度。结果表明, 在 W<sub>3-2</sub> 站, 叶绿素 a 最高浓度出现在 3.0 ~ 4.0cm 层 (7.74  $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 从表层到 4.0cm 层, 其浓度逐渐上升, 4.0 ~ 10.0cm 层之间沉积物, 叶绿素 a 浓度分布均匀 (2.29 ~ 3.08  $\mu\text{g}/\text{g}$ )。W<sub>3-5</sub> 站, 表层 (0.0 ~ 1.0cm) 沉积物叶绿素 a 浓度为 8.43  $\mu\text{g}/\text{g}$ , 1.0 ~ 2.0cm 层的浓度最高, 达 11.28  $\mu\text{g}/\text{g}$ , 在 2.0cm 层以下, 随沉积深度的增加, 其浓度逐渐下降, 在 6.0 ~ 10.0cm 层沉积物柱状样中, 其浓度变化不明显(图 3b)。

## 2.4 浮游植物优势种类、细胞密度的分布和变化

表 1 抚仙湖叶绿素 a 浓度 ( $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ ) 的季节变化 (2001)

Table 1 Seasonal variation of chlorophyll a concentration in Fuxian Lake (2001)

采样层次 Sampling depth(m)	5月26日 May 26	8月14日 Aug. 14	9月13日 Sept. 13	9月18日 Sept. 18
0	1.85 ± 0.20	1.38 ± 0.15	2.03 ± 0.33	2.27 ± 0.12
10	1.67 ± 0.26	1.61 ± 0.47	2.86 ± 0.45	2.89 ± 0.53
20	1.47 ± 0.30	1.35 ± 0.55	1.71 ± 0.29	2.51 ± 0.82
50	0.31 ± 0.10	0.28 ± 0.02	0.17 ± 0.05	0.30 ± 0.05
100	0.18 ± 0.06	0.19 ± 0.03	0.05 ± 0.04	0.18 ± 0.06
底层 Bottom	0.17 ± 0.05	0.17 ± 0.05	0.07 ± 0.02	0.14 ± 0.06
变化范围 Range	0.11 ~ 2.11	0.12 ~ 2.08	0.01 ~ 3.21	0.05 ~ 3.92

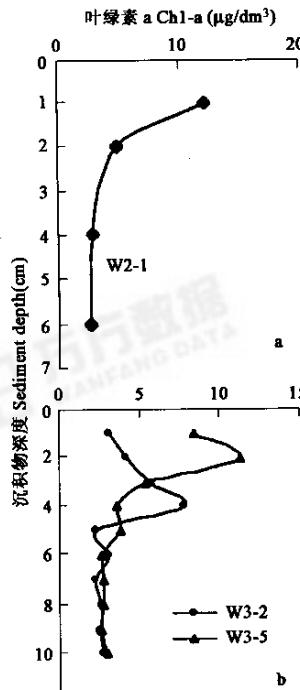


图 3 沉积物叶绿素 a 浓度 ( $\mu\text{g}/\text{g}$ ) 垂直分布 (2001 年)

Fig. 3 Vertical distribution of Chlorophyll a concentrations in sediment (2001)

(a) 9月13日 Sept. 13; (b) 9月18日 Sept. 18

抚仙湖浮游植物有7门,40属78种。种类组成以绿藻门占优势(43.5%),有18属34种,蓝藻门次之(24.4%),有9属19种,其它藻类根据出现种群数多少排序,依次为硅藻、甲藻、金藻、裸藻和黄藻(表2)。浮游植物主要优势种为转板藻 *Mougeotia bloodlei*、广缘小环藻 *Cyclotella bodanica*、色球藻 *Chroococcus* spp.、飞燕角甲藻 *Ceratium hirundinella*、花环微囊鞭藻 *Dinobryon sertularia* 等,在不同季节,优势种有一定的变化。

浮游植物细胞密度有明显的季节变异,9月份的细胞密度最高,8月份次之,5月份的细胞密度最低。浮游植物细胞密度垂直分布,除9月份的10m层出现最高值之外,其它主要分布特征为:从表层到底层,其细胞密度逐渐下降。水体6个不同观测层次细胞密度的季节变异趋势相似(图4)。关于浮游植物的种类名录详见后续相关文章报道。

### 3 讨论

#### 3.1 抚仙湖水体叶绿素a浓度分布规律及其与理化因子的关系

研究表明,抚仙湖水体叶绿素a浓度稍高于6a前邓新晏等调查的结果<sup>[3]</sup>,其浓度在真光层(约20m)中变化显著,在真光层外,叶绿素a浓度明显呈梯度下降(图5),这表明光照强度对水体叶绿素a浓度的分布起主导作用。叶绿素a浓度分布的季节变化明显,其平均浓度的高低顺序是:9月份>5月份>8月份。8月份,抚仙湖降雨量明显增多,光照时间减少,影响浮游植物的光合作用和生长代谢速率,导致叶绿素a浓度下降。9月份,随着雨季的结束,光照时间又明显增加,有利于浮游植物的生长代谢和繁殖,使叶绿素a浓度升高。就抚仙湖水体叶绿素a浓度水平而言,比一般湖泊的叶绿素a浓度低得多<sup>[6]</sup>,总体上看,抚仙湖属于贫营养型湖泊。

通常,叶绿素a浓度能反映出浮游植物现存生物量,本研究表明,浮游植物细胞密度的垂直分布与叶绿素a浓度的基本一致,叶绿素a浓度与浮游植物细胞密度之间呈现显著正相关关系(图6)。叶绿素a浓度与溶解氧(DO)之间存在明显正相关关系,系因浮游植物在光合作用中释放氧分子,使水体溶解氧浓度增加的缘故。除了光照条件和浮游植物细胞密度影响叶绿素a浓度之外,影响水体叶绿素a浓度的其它限制因子是营养盐。研究表明,叶绿素a浓度与NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、TIN和PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P之间均存在明显负相关关系,据同期观测的水文数据分析,抚仙湖水体中存在明显的温跃层,导致水

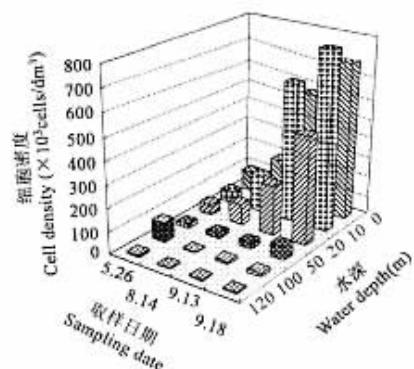


图4 抚仙湖浮游植物细胞密度垂直分布和季节变化(2001年)

Fig. 4 Vertical distribution and seasonal variation of cell density of phytoplankton in Fuxian Lake(2001)

表2 抚仙湖浮游植物群落组成(2001年)

Table 2 Community composition of phytoplankton in Fuxian Lake (2001)

项目 Item	属数 Genus	种数 Species	百分比(%) Percentage
绿藻门 Chlorophyta	18	34	43.5
蓝藻门 Cyanophyta	9	19	24.4
硅藻门 Bacillariophyta	6	10	12.8
甲藻门 Pyrrhophyta	2	6	7.7
金藻门 Chrysophyta	2	5	6.4
裸藻门 Euglenophyta	1	2	2.6
黄藻门 Xanthophyta	2	2	2.6
总计 Total	40	78	100

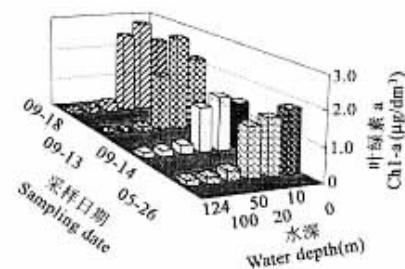


图5 叶绿素a浓度垂直分布和季节变化(μg/dm³)(2001年)

Fig. 5 Vertical distribution of chlorophyll a concentrations and seasonal variation

体交换性差,水体相对稳定,且营养盐的现存量不高,真光层中浮游植物旺盛的生长代谢吸收大量的营养盐,因被高度利用而贫乏的营养盐得不到及时补充,破坏营养盐结构的平衡,导致  $\text{NO}_3^-$ -N、TIN 和  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 浓度下降,因而,呈现负相关关系(表 3)。总无机氮与磷比值(N/P)的分析结果表明,水体中除了个别层次之外,N/P 的比值均远高于浮游植物对 N 和 P 的最佳平衡吸收比<sup>[7]</sup>,最高 N/P 值达 1226,分布于 W<sub>2-3</sub> 站的 50m 层。从 N、P 营养盐的总体水平看,水体的 P 营养盐贫乏,且浮游植物生长代谢对 P 营养盐的吸收速率大于对 N 营养盐的吸收速率<sup>[8]</sup>,而 N 营养盐的现存量相对较高,再生快,基本能支持浮游植物生长的需要。硅与磷比值(Si/P)的分析结果表明,抚仙湖水体 Si/P 比均高于浮游植物生长的 Si/P 比限制值 22,结合 N/P 的比值,参照 Justic 等<sup>[9]</sup>提出的判断营养盐成为限制性元素的标准,可以初步得出结论,P 可能为抚仙湖浮游植物生长的主要限制因子。

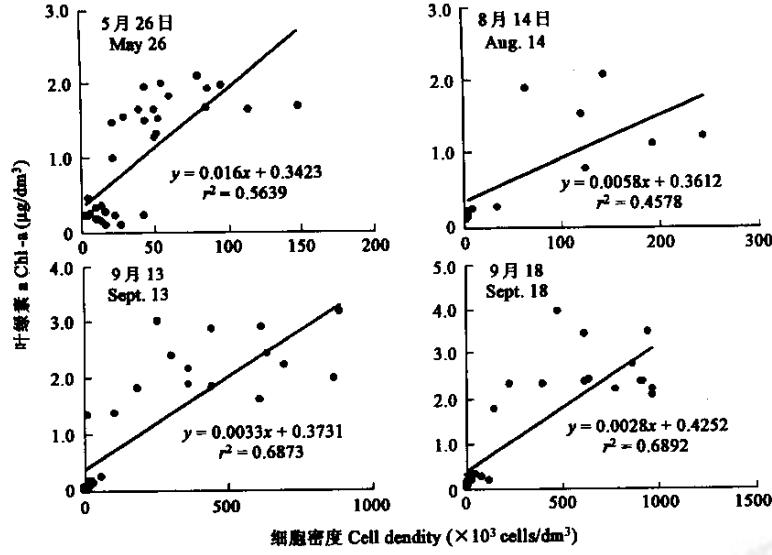


图 6 叶绿素 a 浓度与浮游植物细胞密度的关系(2001 年)

Fig. 6 Correlations between Chlorophyll a concentrations and cells density of phytoplankton (2001)

表 3 叶绿素 a 与化学参数的相关关系(2001 年)

Table 3 Correlation coefficient between chlorophyll a and parameters of chemistry (2001)

参数 Parameter	5月26日(May 26)		8月14日(Aug. 14)		9月13日(Sept. 13)		9月18日(Sept. 18)	
	相关系数(n=33)		相关系数(n=12)		相关系数(n=36)		相关系数(n=30)	
	Correlation coefficient		Correlation coefficient		Correlation coefficient		Correlation coefficient	
$\text{NO}_3^-$ -N	-0.746 **		-0.856 **		-0.848 **		-0.897 **	
TIN	-0.729 **		-0.861 **		-0.849 **		-0.896 **	
$\text{PO}_4^{3-}$ -P	-0.478 **		-0.610 *		-0.619 **		-0.673 **	
DO	0.701 **		0.708 **		0.700 **		0.619 **	

\* 为显著相关  $p < 0.05$ ; \*\* 为极显著相关  $p < 0.01$

### 3.2 沉积物叶绿素 a 的成因及其分布特征

抚仙湖沉积物叶绿素 a 浓度与象山港潮滩<sup>[10]</sup>、Fielding 等<sup>[11]</sup>在 Langebean 湖的观测结果相近。春季,表层沉积物(0~1cm)叶绿素 a 浓度的水平分布差异显著,极值比达 4 倍。从抚仙湖沉积物叶绿素 a 浓度垂直分布看,表层和数米深沉积物叶绿素 a 浓度高,随着沉积深度增加,叶绿素 a 浓度逐渐下降。本研究表明,在水深达 100m 以上的沉积物中,仍有较高叶绿素 a 浓度,这种现象,应用藻类光合作用的理论难以解释。

对于沉积物叶绿素a的来源,近几年,已有相关研究报道<sup>[12~15]</sup>。一般认为沉积物叶绿素a的来源主要是由蓝细菌的聚球菌、硅藻门的小环藻和绿藻门的小球藻所贡献,尤其是聚球菌和小环藻等浮游植物在旺发期,有一部分藻类细胞沉降至底部,成为沉积物叶绿素a的主要来源<sup>[12,16]</sup>;另一方面,在水环境条件不良(如水温低、营养盐匮乏)的情况下,甲藻通过有性繁殖方式,形成甲藻休眠孢囊沉降到水底表层沉积物中<sup>[17,18]</sup>,这也是沉积物叶绿素a的主要来源之一;此外,水底微型藻类、浮游动物过剩摄食藻类而未被消化的植物细胞伴随着粪团沉降至水底也是沉积物叶绿素a的来源。本研究结果表明,抚仙湖沉积物主要优势种类为硅藻门的小环藻,这与Steindinger等<sup>[19]</sup>对佛罗里达湾沉积物藻类组成的研究结果相似,由此推断,硅藻门的小环藻是抚仙湖沉积物中叶绿素a的主要来源。

### 3.3 沉积物和水界面叶绿素a与环境的关系探讨

在一定的条件下,营养盐在沉积物包括悬浮物上会出现明显的释放、分解或解析作用,从而加重上覆水营养程度<sup>[20]</sup>,抚仙湖沉积物上覆水的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P明显高于底层水的浓度,而N/P的变化范围在17.9~21.4之间,大于藻类生长对N和P的平衡吸收比值7,表明P营养盐可能是限制因子。上覆水叶绿素a浓度与真光层中的浓度相近,明显高于底层水的叶绿素a浓度,这可能由以下几方面原因形成,首先,沉积物表面底栖动物的代谢活动,扰动水体界面,使表层沉积物中微型藻类(休眠孢囊等)释放到界面,形成再悬浮状态<sup>[21]</sup>,导致沉积物与水界面的叶绿素a浓度升高。其次,在春、夏季,微型藻类旺发,部分藻类细胞下沉至湖底,以悬浮状态聚集在沉积物和水界面中,导致叶绿素a浓度上升。另一方面,由于调查期间系抚仙湖的雨季,沿岸陆缘径流量大,使水体中浮游植物细胞沉降比例上升,因而导致沉积物与水界面的叶绿素a浓度增加。显然,水底微型藻类的再悬浮对沉积物与水界面的叶绿素a起主要作用。关于水底微型藻类的分类、细胞丰度、生物量分布和生产力的研究是今后生态学研究的新领域。

## 4 结论

(1)研究表明,抚仙湖水体叶绿素a浓度在真光层中变化显著,在真光层外,叶绿素a浓度明显呈梯度下降,光照强度对水体叶绿素a浓度的分布起主导作用。叶绿素a浓度分布的季节变异明显,其平均浓度的高低顺序是:9月份>5月份>8月份。

(2)结合水体中营养元素的分布特征及其与叶绿素a之间的关系,表明磷是抚仙湖藻类生长的主要限制因子。

(3)沉积物中叶绿素a浓度的含量在表层和次表层较高,并随深度的增加而降低;浮游植物分析表明,硅藻门的小环藻是抚仙湖沉积物中叶绿素a的主要来源。

(4)上覆水中叶绿素a的浓度与真光层中的浓度相当的原因,可能是由水底微型藻类的再悬浮以及浮游植物的沉降聚集而导致的。

## References:

- [1] Yang S K. Fuxian Lake of Yunnan. In: Jin X C, et al. ed. *Environment of the Lake in China*. Beijing: China Ocean Press, 1995. 211~237.
- [2] Gao L C. Aquatic organism. In: Nanjing Institute of Geography & Limnology of the Chinese Academy of Sciences Ed. *Fuxian Lake*. Beijing: China Ocean Press, 1990. 273~279.
- [3] Deng X Y, Xu J H. Studies on algae of Fuxian Lake in Chengjiang County, Yunnan. *Journal of Yunnan University*, 1996, **18**(2): 139~145.
- [4] The specification for oceanographic survey (GB 12763. 6-91). State Technology Supervision Bureau. Beijing: Standards Press of China, 1991.
- [5] Huang X F, Chen W M, Cai Q M. eds. *Survey, Observation and Analysis of Lake Ecology*. Beijing: Standards Press of China, 1999. 72~105.
- [6] Ning X R, Shi J X, Liu Z L, et al. Investigation of primary production and eutrophication in the waters of West Lake Hangzhou. *Limnologia et Limnologia Sinica*, 1989, **20**(4): 365~374.
- [7] Liu H Y, Xu Y L. Preliminary observations of algal growth and lake eutrophication in Jingbo Lake. *Acta*

*Ecologica Sinica*, 1996, **16**(2): 195~201.

- [8] Li T, Shi Z L, Qiu C B, et al. A Study on the uptake rate of the nutrients by *Skeletonema costatum* and *Nitzschia closterium* and the environmental effects. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1999, **30**(6): 640~644.
- [9] Justic D, Rabalais, N N, Turner R E, et al. Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters, stoichiometric nutrient balance and its consequences. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1995, **40**: 339~356.
- [10] Ning X R, Liu Z L, Cai Y M. Standing crop and productivity of the benthic microflora living on tidal flats of the Xiangshan Bay. *Acta Oceanologica Sinica*, 1999, **21**(3): 98~105.
- [11] Fielding P J, Damstra K St J, Branch G M. Benthic diatom biomass, production and sediment chlorophyll in Langebean Lagoon, South Africa. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1988, **27**: 413~426.
- [12] Louda J W, Loitz J W, Runick D T, et al. Early diagenetic alteration of chlorophyll-a and bacteriochlorophyll-a in a contemporaneous marl ecosystem, Florida Bay. *Organic Geochemistry*, 2000, **31**: 1561~1580.
- [13] Radziejewska T, Fleeger J W, Rabalais N N, et al. Meiofauna and sediment chloroplastic pigments on the continental shelf off Louisiana, U. S. A.. *Continental Shelf Research*, **16**(13): 1699~1723.
- [14] Cahoon L B, Redman R S, Tronzo C R. Benthic microalgal biomass in sediments of Onslow Bay, North Carolina. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1990, **31**: 805~816.
- [15] Josefson A B, Forbes T L, Rosenberg R. Fate of phytodetritus in marine sediments: functional importance of macrofaunal community. *Marine Ecology Progress Series*, 2002, **230**: 71~85.
- [16] Pakhomov E A, Froneman P W, Wassmann P, et al. Contribution of algal sinking and zooplankton grazing to downward flux in the Lazarev Sea (Southern Ocean) during the onset of phytoplankton bloom: a lagrangian study. *Marine Ecology Progress Series*, 2002, **233**: 73~88.
- [17] Lin Y S, Cao W Q, Sameer T, et al. Studies on dinoflagellate cysts and their distribution in Xiamen Western Harbour. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, **33**(4): 407~414.
- [18] Li C, Lan D Z, Fang Q, et al. Dinoflagellate cysts from sediments of Sansha Bay, Fujian. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2003, **22**(1): 38~45.
- [19] Steidling K A, Philips E J. Florida Bay microalgal blooms: composition, abundance and distribution. In: Brock R J, Cato J C, Seaman W Eds. *Proceedings of the second annual Florida Bay Science Conference, Key Largo, Florida*, 10~12 December. Univ. Florida and Sea Grant of Florida, Tallahassee, 1996. 77~79.
- [20] Fan C X, Zhang L, Yang L Y, et al. Simulation of internal loadings of nitrogen and phosphorus in a lake. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, **33**(4): 370~378.
- [21] Annika S D, Hansson L A. Effects of bioturbation on recruitment of algal cells from the "seed bank" of lake sediments. *Limnol Oceanogr.*, 2002, **47**(6): 1836~1843.

## 参考文献:

- [1] 杨世宽. 云南抚仙湖. 见: 金相灿等主编. 中国湖泊环境. 北京: 海洋出版社, 1995. 211~237.
- [2] 高礼存. 水生生物. 见: 中国科学院南京地理与湖泊研究所主编. 抚仙湖. 北京: 海洋出版社, 1990. 273~279.
- [3] 邓新晏, 许继宏. 澄江抚仙湖藻类植物研究. 云南大学学报(自然科学版), 1996, **18**(2): 139~145.
- [4] 海洋调查规范. GB 12763.6-91. 国家技术监督局. 北京: 中国标准出版社, 1991.
- [5] 黄祥飞, 陈伟民, 蔡启铭主编. 湖泊生态调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 1999. 72~112.
- [6] 宁修仁, 史君贤, 刘子琳, 等. 西湖水域初级生产力和富营养化的调查研究. 海洋与湖沼, 1989, **20**(4): 365~374.
- [7] 刘鸿雁, 徐云麟. 镜泊湖藻类生长和湖泊富营养化的预测初探. 生态学报, 1996, **16**(2): 195~201.
- [8] 李铁, 史致丽, 仇赤斌, 等. 中肋骨条藻和新月菱形藻对营养盐的吸收速率及环境因素研究. 海洋与湖沼, 1999, **30**(6): 640~645.
- [9] 宁修仁, 刘子琳, 蔡昱明. 象山港潮滩底栖微型藻类现存量和初级生产力. 海洋学报, 1999, **21**(3): 98~105.
- [10] 林元烧, 曹文清, Sameer T, 等. 厦门西港甲藻孢囊种类和数量分布特征. 海洋与湖沼, 2002, **33**(4): 407~414.
- [11] 李超, 周东升, 等. 三沙湾海域沉积物中甲藻休眠孢囊的初步研究. 台湾海峡, 2003, **22**(1): 38~45.
- [12] 范成新, 张路, 杨龙元, 等. 湖泊沉积物氮磷内源负荷模拟. 海洋与湖沼, 2002, **33**(4): 370~378.