

## 附着藻类对太湖沉积物磷释放的影响\*

张 强<sup>1,2</sup>, 刘正文<sup>1\*\*</sup>

(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:** 附着藻类是清水态浅水湖泊的重要组成部分, 为了解附着藻类对湖泊沉积物磷释放的影响, 在室内柱状装置中, 将尼龙网所培养的附着藻类加盖到太湖沉积物上, 即处理组, 并设置无附着藻类加盖的对照组, 进行为期 13d 的实验. 结果表明: 加附着藻类的处理组中的无机磷释放速率显著低于无附着藻类的对照组. 与对照组相比, 实验期间加附着藻类的处理组释放到水体中的磷, 平均减少 1.16mg. 其中附着藻类吸收了 0.81mg 磷 (70%), 而附着藻类通过光合作用改变沉积物表面的氧环境抑制了 0.35mg 磷的释放 (30%). 研究表明, 底栖附着藻类可以通过吸收磷和抑制沉积物磷释放降低水中营养盐含量.

**关键词:** 附着藻类; 沉积物; 磷释放; 太湖; 模拟

## Simulation on the effect of periphytic algae on phosphorus release from sediments of Lake Taihu

ZHANG Qiang<sup>1,2</sup> & LIU Zhengwen<sup>1</sup>

(1: *State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China*)

(2: *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China*)

**Abstract:** Periphytic algal community is an important autotrophic component of shallow lakes with clear water states. In order to understand the effect of periphytic algae on phosphorus release from lake sediments, a 13-day laboratory experiment was carried out by using Plexiglas tubes contained sediments from Lake Taihu, which covered with periphytic algae precultivated on nylon nets as treatments and without periphytic algae as controls. The results showed that rates of release of inorganic phosphorus from sediments in the treatments with periphytic algae were significantly lower than that in the control without periphytic algae. During the experimental period, an average of 1.16mg phosphorus was reduced in treatments comparing with the controls, 70% (0.81mg) of which was caused by phosphorus uptake of periphytic algae, and 30% (0.35mg) was attributed to reduction in phosphorus release from the sediments due to improved redox condition in sediment surface by photosynthetic activity of periphytic algae. Present study suggests that benthic (periphytic) algae can reduce phosphorus concentration in water by direct uptake and inhibition of sediment phosphorus release.

**Keywords:** Periphytic algae; sediment; phosphorus release; Lake Taihu; simulation

湖泊沉积物营养盐释放是影响湖泊浮游植物生长和富营养化的关键过程之一<sup>[1-2]</sup>, 而磷(P)往往是藻类生长的限制因子, 沉积物的 P 释放会造成水体 P 含量和初级生产力增加<sup>[3]</sup>. 附着藻类是清水态浅水湖泊中的主要初级生产者之一, 可以吸收水体中的 P 营养盐和抑制沉积物 P 营养盐的释放<sup>[4-5]</sup>, 对湖泊生态系统的营养盐循环具有重要作用<sup>[6-7]</sup>. 底栖附着藻类能够影响沉积物与水界面的氧化还原环境<sup>[8-9]</sup>和无机营养盐的交换<sup>[10-11]</sup>. 因此, 研究附着藻类影响沉积物 P 释放的机理, 对了解湖泊营养盐循环和治理富营养化湖泊有着

\* 国家科技支撑计划项目(2007BAC26B02)和国家高新技术研究与发展项目(2006AA06Z337)联合资助. 2010-01-04 收稿; 2010-04-20 收修修改稿. 张强, 男, 1981 年生, 博士研究生; E-mail: zq1981449@sohu.com.

\*\* 通讯作者; E-mail: zliu@niglas.ac.cn.

重要意义.

国外学者对附着藻类影响沉积物 P 释放的机理研究开展较早,但由于实验方法和实验条件的不同,得出的结论存在差异.有的学者认为附着藻类主要通过直接吸收从而减少沉积物 P 向上覆水的释放<sup>[12]</sup>,有的则认为附着藻类光合作用影响沉积物与水界面的化学性质,进而抑制沉积物 P 释放<sup>[13-14]</sup>.国内有关附着藻类对湖泊沉积物 P 营养盐的影响研究还尚未见报道.随着富营养化的加剧,更多的浅水湖泊附着藻类群落也逐步减少,甚至消失,湖泊逐步变成混水态.为此,本研究通过人工基质培养附着藻类群落,在实验室加盖于沉积物表面,通过与未加盖附着藻类的沉积物的比较,了解附着藻类对太湖沉积物 P 释放的影响,为湖泊生态修复提供依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 附着藻类的培养

2009年3月在太湖贡湖湾北岸附近一原位围隔内(350m×250m),垂直布设共30条尼龙网,每条规格为50m×2.5m,以此来作为人工基质,进行附着藻类富集.尼龙网高度在2.5m,上端每间隔1m设一浮球,下端用石笼固定于底泥中.3个月后(2009年6月18日)从围隔中悬挂的尼龙网上水下30cm处,随机剪取若干块(50cm×50cm)长有附着藻类的尼龙网,低温保存于保温箱内,并带回室内.室内将载有附着藻类的尼龙网放入一个水箱内进行3天的附着藻类适应性培养.实验开始前(2009年6月21日),随机剪取3小块尼龙网片(5cm×5cm)测定附着藻类有机质含量及其体内P含量.富集的附着藻类主要为颗粒直链藻(*Melosira granulata*)(经过鉴定湖中尼龙网上自然富集的附着藻类主要为颗粒直链藻,附着藻类本质上为浮游藻类的变形,一些藻类既可以在水体中自由运动也可以附着在人工基质上.本研究的目的旨在通过人工基质的建立来在其上形成藻类生物膜,探讨其对富营养化湖泊水中营养盐循环的作用).

### 1.2 实验设计

实验在6个树脂玻璃圆柱桶内(直径20cm,高度50cm,底面积314cm<sup>2</sup>)进行,设两组处理,即添加附着藻类的处理组和无附着藻类的对照组,每组处理设3个重复.在各桶内铺设5cm厚,重为1600g的泥样,泥样是2009年6月10日从太湖梅梁湾沿岸通过挖取表层约10cm的沉积物,混合好,晒干,过80目筛(网目孔径0.2mm)而获得,泥样总磷含量为0.709g/kg.之后再加入12L水,桶内水柱高为39.5cm.实验所用自来水是自来水和蒸馏水以1:1比例混合而来,桶内水位通过补充所用水来保持.树脂玻璃圆柱桶壁的下部有一个带塞出水口,用于收集上覆水样,所有圆柱桶都放于空气流通的平台上,到达底部的光照为表面的78%.实验开始时,将载有附着藻类的尼龙网( $S=314\text{cm}^2$ )加盖于圆柱桶底部(处理组),而在对照组的3个圆柱桶内加盖同网目的无附着藻类的尼龙网.

### 1.3 样品采集与处理

实验从2009年6月21日开始,共进行13d,前两次每隔2d取样一次,后三次取样每隔3d.每次取样前用便携式Eh测定仪在沉积物表层1cm测定氧化还原电位(Eh).然后从桶壁出水口接取沉积物上覆水样50ml,过滤(醋酸纤维滤膜, $\Phi=0.45\mu\text{m}$ ).实验结束时从处理组的每个尼龙网上随机剪取一块网片(5cm×5cm),用于收集附着藻类.附着藻类取样是将网片上的附着藻类用毛刷刮下过150目筛,得到的剩余物中将非藻类颗粒杂物挑出,之后用蒸馏水反复冲洗若干次,最后再用蒸馏水将所收集的附着藻类定容到30ml,得到附着藻类的悬浮液.

### 1.4 测定方法

1.4.1 无机磷测定 将从处理组和对照组桶内过滤后的50ml上覆水样中吸取10ml放于25ml比色管内,参照抗坏血酸钼酸铵法<sup>[15]</sup>在分光光度计下测定水样的无机磷( $\text{PO}_4\text{-P}$ )浓度.

1.4.2 附着藻类有机质含量的测定 从处理好的附着藻类悬浮液中取20ml经预先烘干称重的Whatman GF/C膜过滤,然后在60℃烘干并称量.将称重后的附着藻类在550℃下灼烧2h再称重,通过计算重量损失所得到的去灰分干重(AFDW)来表示人工基质上附着藻类的有机质含量( $\text{mg AFDW}/\text{cm}^2$ ).

1.4.3 附着藻类体内P含量的测定 将称重后的滤膜上的灰分刮下后加5ml加热好的1mol/L盐酸抽提1h,滤出液定容到50ml,测定附着藻类体内的P含量<sup>[16]</sup>.附着藻类体内P含量以单位AFDW的P含量来表示

(mg/g AFDW).

### 1.5 数据处理

利用 SPSS 13.0 (SPSS Inc., USA) 软件对所有数据进行统计计算, 利用方差分析 (ANOVA) 比较对照组与处理组间的差异显著性,  $P < 0.05$  认为差异显著.

## 2 结果

### 2.1 Eh 的变化

表 1 对照组与处理组的氧化还原电位\*

Tab.1 Eh of the controls and treatments during the experiment

时间(d)	Eh(mV)	
	对照组	处理组
0	220 ± 2	220 ± 1
2	212 ± 2	220 ± 1
4	221 ± 1	232 ± 8
7	230 ± 1	230 ± 2
10	191 ± 1	222 ± 4
13	180 ± 9	231 ± 3

\* 数据为 3 个平行样的平均值和标准偏差.

实验开始时 (第 0d), 处理组与对照组内沉积物表面的 Eh 平均值均为 220mV, 实验结束时 (第 13d), 无附着藻类的对照组的 Eh 值降低至  $180 \pm 9$ mV, 而处理组的变化不大 ( $231 \pm 3$ mV), 实验过程中处理组的 Eh 值显著高于对照组 ( $P < 0.01$ ) (表 1).

### 2.2 沉积物 PO<sub>4</sub>-P 释放的变化

对照组与处理组的上覆水中 PO<sub>4</sub>-P 浓度的变化可看出, 对照组长覆水中 PO<sub>4</sub>-P 的浓度显著高于加附着藻类的处理组 (图 1a,  $P < 0.01$ ). 通过各组相邻两次取样前后上覆水中 PO<sub>4</sub>-P 浓度的差异、树脂玻璃圆柱桶底面积 ( $S = 314\text{cm}^2$ ) 以及取样间隔时间, 可以计算该期间 PO<sub>4</sub>-P 的释放速率 ( $\mu\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ ). 通过比较各次采样中对照组与处理组的 PO<sub>4</sub>-P 的释放速率, 可以发现对照组沉积物中的 PO<sub>4</sub>-P

的释放速率显著高于处理组 (图 1b,  $P < 0.01$ ). 对照组沉积物的 PO<sub>4</sub>-P 释放速率是处理组的 2 - 50 倍.

### 2.3 对照组与附着藻类处理组上覆水中 P 的增量比较

通过 PO<sub>4</sub>-P 浓度和上覆水体积, 可以计算得到上覆水中总的 P 量. 相比第 0d, 加附着藻类的处理组在第 13d 上覆水中增加的 P 总量平均为 0.48mg, 显著低于对照组 (1.64mg), 表明处理组比对照组平均减少了 1.16mg P 释放到水体中.

### 2.4 附着藻类体内富集的 P 的总量

第 0d 附着藻类有机质含量、附着藻类体内 P 含量以及人工基质上 ( $S = 314\text{cm}^2$ ) 附着藻类体内总的含 P 量 (利用附着藻类有机质含量与其体内 P 含量计算得到) 分别为  $4.75 \pm 0.72\text{mg AFDW}/\text{cm}^2$ 、 $0.24 \pm 0.040\text{mg/g AFDW}$ 、 $0.37 \pm 0.11\text{mg}$ , 而第 13d 分别为  $5.50 \pm 0.241\text{mg AFDW}/\text{cm}^2$ 、 $0.745 \pm 0.301\text{mg/g AFDW}$ 、 $1.18 \pm 0.49\text{mg}$ . 相比第 0d, 第 13d 的附着藻类有机质含量平均增加了  $0.75\text{mg AFDW}/\text{cm}^2$ , 其体内的 P 含量平均增加了  $0.505\text{mg/g AFDW}$ . 第 13d 的附着藻类体内总的含 P 量比第 0d 增加了 0.81mg.

## 3 讨论

### 3.1 附着藻类对沉积物 P 的吸收

Hansson<sup>[12]</sup> 利用放射性同位素 P 标记示踪法发现附着藻类可以吸收沉积物释放出的大部分 P (84%), 并增加其生物量. 姚杨等<sup>[17]</sup> 通过控制光照度增加沉积物表层底栖藻类的生物量, 从而增加其对沉积物中 P 的吸收同化作用, 抑制了沉积物中的 P 向上覆水中释放. 本实验中, 通过比较对照组与处理组中沉积物 PO<sub>4</sub>-P 释放速率的变化 (图 1b), 发现加附着藻类的处理组能够显著降低沉积物中 PO<sub>4</sub>-P 的释放速率. 实验结束时附着藻类有机质含量有所增加, 表明人工基质上的附着藻类可以吸收沉积物释放的 PO<sub>4</sub>-P (吸收了 0.81mg), 增加其有机质含量. 处理组比对照组沉积物的 PO<sub>4</sub>-P 释放大大减少, 附着藻类对 PO<sub>4</sub>-P 的吸收贡献了大部分作用 (70%).

### 3.2 附着藻类在抑制 P 释放中的作用

本实验中处理组可减少平均 1.16mg P 释放到水体中, 而附着藻类吸收了平均 0.81mg P, 表明人工基质

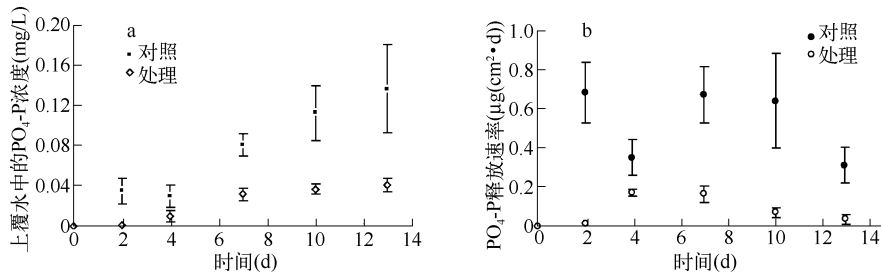


图1 有附着藻类处理组和无附着藻类对照组上覆水 PO<sub>4</sub>-P 的浓度(a)和沉积物 PO<sub>4</sub>-P 释放速率(b)  
(误差线代表三次重复样品平均值的标准偏差)

Fig. 1 Concentration of PO<sub>4</sub>-P in the overlying water (a) and rates of release of PO<sub>4</sub>-P from the sediments (b) in treatments with periphytic algae and in controls without periphytic algae covering the sediment surfaces

上的附着藻类不仅可以吸收 PO<sub>4</sub>-P,还可能通过其他方式来抑制沉积物释放 PO<sub>4</sub>-P. Jorgensen 和 Revsbech<sup>[13]</sup> 以及 Dodds<sup>[14]</sup> 曾报道浅水湖泊的沉积物表面,附着藻类光合作用可以制造氧气,并产生有氧微环境,从而影响和抑制沉积物释放 P. Carlton 和 Wetzel<sup>[18]</sup> 通过周期性控制光照也发现附着藻类进行光合作用时期,能在沉积物表层制造有氧区,抑制沉积物释放 P. 而在附着藻类不进行光合作用时期,沉积物表层缺氧,P 释放速率加快. 本实验后期有附着藻类的处理组沉积物表层的氧化还原电位高于无附着藻类的对照组(表 1),表明处理组附着藻类的光合作用会增加沉积物表层含氧量,导致沉积物表层氧化还原电位升高,进而会抑制沉积物释放 P. 因此,本研究沉积物中其余 0.35mg P(30%) 的释放被抑制,这很可能与附着藻类对沉积物氧环境改变有关. Moore 等<sup>[19]</sup> 研究表明缺氧情况下沉积物磷的释放速率是有氧情况下的 5 倍之多. 本研究中对照组沉积物磷的释放速率是处理组的 2-50 倍. 这一方面与附着藻类直接吸收 P 的作用有关,另一方面有氧环境对抑制沉积物 P 释放也起到一定作用,说明底栖附着藻类可以通过吸收磷和抑制沉积物磷释放降低水中营养盐含量.

Sundbäck 和 Granéli<sup>[5]</sup> 研究认为,与附着藻类直接吸收 N、P 营养盐相比,其光合作用通过改变沉积物表面的氧环境来影响沉积物与水体间的营养盐流动显得更为重要. 相反, Hansson<sup>[12]</sup> 通过放射性 P 同位素示踪手段认为附着藻类主要通过直接吸收 P 来减少沉积物释放到水中的 P 营养盐,而附着藻类没有明显引起沉积物表面的有氧环境的变化. 本研究中沉积物释放出的 P 其中 70% 被附着藻类吸收,而另外 30% 是由于附着藻类的光合作用改变沉积物表面的氧环境所抑制,表明附着藻类吸收 P 对减少沉积物向上覆水中释放 P 营养盐的作用更大. 本研究只进行了 13d,而且是在实验条件下进行的,附着藻类对太湖沉积物-水层磷交换的长期影响还需要进一步的研究,尤其需要原位研究.

#### 4 参考文献

- [1] Kisand A, Nöges P. Sediment phosphorus release in phytoplankton dominated versus macrophyte dominated shallow lakes: importance of oxygen conditions. *Hydrobiologia*, 2003, **506/509**:129-133.
- [2] Hubble DS, Harper DM. Nutrient control of phytoplankton production in Lake Naivasha, Kenya. *Hydrobiologia*, 2002, **488**:99-105.
- [3] Kelderman P. Sediment-water exchange inlake Grevelingen under different environmental conditions. *Netherlands Journal of Sea Research*, 1984, **18**(3/4):286-311.
- [4] Hansson LA. Quantifying the impact of periphytic algae on nutrient availability for phytoplankton. *Freshwater Biology*, 1990, **24**:265-273.
- [5] Sundbäck K, Granéli W. Influence of microphytobenthos on the nutrient flux between sediment and water: a laboratory study. *Marine Ecology Progress Series*, 1988, **43**:63-69.
- [6] Mulholland PJ, Steinman AD, Marzolf ER et al. Effect of periphyton biomass on hydraulic characteristics and nutrient cycling in streams. *Oecologia*, 1994, **98**:40-47.

- [ 7 ] Liboriussen L, Jeppesen E. Temporal dynamics in epipellic, pelagic and epiphytic algal production in a clear and a turbid shallow lake. *Freshwater Biology*, 2003, **48**(3):418-431.
- [ 8 ] Revsbech NP, Jørgensen BB. Photosynthesis of benthic microflora measured with high spatial resolution by the oxygen microprofile method; capabilities and limitations of the method. *Limnol & Oceanogr*, 1983, **28**:749-756.
- [ 9 ] Baille PW. Oxygenation of intertidal estuarine sediments by benthic microalgal photosynthesis. *Estuarine, Coastal & Shelf Science*, 1986, **22**:143-159.
- [ 10 ] Wetzel RG. Benthic algae and nutrient cycling lentic freshwater systems. In: Stevenson RJ, Bothwell ML, Lowe RL eds. *Algal ecology: freshwater benthic ecosystems*. San Diego: Academic Press, 1996:641-667.
- [ 11 ] Havens KE, East TL, Rodusky AJ *et al.* Littoral periphyton responses to nitrogen and phosphorus: an experimental study in a subtropical lake. *Aquatic Botany*, 1999, **63**:267-290.
- [ 12 ] Hansson LA. Effects of competitive interactions on the biomass development of planktonic and periphytic algae in lakes. *Limnol & Oceanogr*, 1988, **33**(1):121-128.
- [ 13 ] Jørgensen B, Revsbech N. Photosynthesis and structure of benthic microbial mats; Microelectrode and SEM studies of four cyanobacterial communities. *Limnol & Oceanogr*, 1983, **28**:1075-1093.
- [ 14 ] Dodds WK. The role of periphyton in phosphorus retention in shallow freshwater aquatic system. *Journal of Phycology*, 2003, **39**:840-849.
- [ 15 ] 金相灿,屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范(第二版). 北京:中国环境科学出版社,1990.
- [ 16 ] Hill WR, Fanta SE, Roberts BJ. Quantifying phosphorus and light effects in stream algae. *Limnol & Oceanogr*, 2009, **54**(1):368-380.
- [ 17 ] 姚 杨,金相灿,姜 霞等. 光照对湖泊沉积物磷释放及磷形态变化的影响研究. *环境科学研究*, 2004, **17**:30-33.
- [ 18 ] Carlton RG, Wetzel RG. Phosphorus flux from lake sediments; effects of epipellic algal oxygen production. *Limnol & Oceanogr*, 1988, **33**:562-570.
- [ 19 ] Moore PA Jr, Reddy KR, Fisher MM. Phosphorus flux between sediment and overlying water in Lake Okeechobee, Florida; Spatial and temporal variations. *Journal of Environmental Quality*, 1998, **27**:1428-1439.