

裴国凤, 刘国祥, 胡征宇. 2009 武汉东湖底栖藻类对磷的滞留作用 [J]. 环境科学学报, 29 (4): 840– 845
Pei G F, Liu G X, Hu Z Y. 2009 The role of benthic algae in phosphorous retention in Donghu Lake, Wuhan [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 29 (4): 840– 845

武汉东湖底栖藻类对磷的滞留作用

裴国凤¹, 刘国祥^{2*}, 胡征宇²

1 中南民族大学生命科学院, 武汉 430074
2 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072
收稿日期: 2008-05-13 修回日期: 2008-10-23 录用日期: 2009-02-16

摘要: 测定了底栖藻类在武汉东湖沿岸带人工基质上建群时的生物量和藻垫中不同组分的磷含量, 结果显示, 建群期间底栖藻类的生物量 (叶绿素 a 和无灰干质) 与总磷 (total phosphorus, TP) 含量显著相关. 建群早期藻垫中总磷的含量随底栖藻类生物量的缓慢增加而增加, 随着以绿藻占优势的底栖藻类群落的发展, 生物量呈指数级增加, 藻垫的总磷含量也快速增加, 两者同时在第 28d 达到最高峰值 (Chl a = $54.5 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$; TP = $96.7 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$). 单位生物量的藻垫对磷的滞留作用 (TP/Chl a) 随着底栖藻类生物量的积累而增强 (最高达 $2.43 \mu\text{g} \cdot \mu\text{g}^{-1}$). 藻垫中钙磷、铁磷的百分含量相对较高, 两者之和接近总磷的 80%. 除藻类细胞和藻垫中的其它生物含磷外, 藻垫负荷的磷还可能来自底栖藻类光合作用所导致的金属磷的沉积、藻垫对水体中颗粒态磷的过滤和对底泥中释放磷的截留.
关键词: 底栖藻类; 磷滞留; 生物量; 磷组分

文章编号: 0253-2468 (2009) 04-840-06 中图分类号: X171 文献标识码: A

The role of benthic algae in phosphorous retention in Donghu Lake, Wuhan

PEI Guofeng¹, LIU Guoxiang^{2*}, HU Zhengyu²

1 China College of Life Science, South-central University for Nationalities, Wuhan 430074
2 State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, the Chinese Academy of Science, Wuhan 430072
Received 13 May 2008 **received in revised form** 23 October 2008 **accepted** 16 February 2009

Abstract Benthic algae were colonized on artificial substrata in the littoral zone of Donghu Lake, Wuhan and phosphorus contents of the algal mat were determined. There was a strong significant correlation between benthic algal biomass (chlorophyll a and ash-free dry mass) and total phosphorus (TP) contents during colonization. Total phosphorus content increased as the slowly increasing benthic algal biomass in early colonization stages with the benthic algal community dominated by green algae. As the biomass experienced exponential growth, the TP content of the algal mat rapidly increased also. The highest values (Chl a = $54.5 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$; TP = $96.7 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$) were reached simultaneously on the 28th day. The phosphorous retention capacity of the algal biomass (TP/Chl a) increased with the biomass (up to $2.43 \mu\text{g} \cdot \mu\text{g}^{-1}$). Both calcium-bound phosphate and iron-bound phosphate of the algal mat were high, together occupying about 80% of the total phosphorus. In addition to phosphorus contributions in the algal cells and the other organisms in the algal mat, algal mat loaded phosphorus should also include deposition of metal phosphate caused by benthic algae photosynthesis, filtered particulate phosphorus from the water column, and intercepted phosphorus diffusing from the benthic sediments.
Keywords benthic algae; phosphorus retention; biomass; phosphorus forms

1 引言 (Introduction)

氮磷含量过高导致的水体富营养化引起了世界性水生态系统的水质问题, 尤其是淡水水体, 这将是一个较长时期内我们将要面对的重大问题. 探索有效实用的氮、磷去除技术始终为环保学者们所

关注. 作为淡水水体的重要初级生产者, 底栖藻类是浅水水体能量转换和物质传递过程中的重要一环, 它通过对营养物质的吸收、吸附、氧化分解、沉淀和储存作用成为水生态系统的重要化学调节者 (Liboriussen *et al.*, 2006). 早期的研究成果表明, 底栖藻类在浸入水中塑料片上的生长能够增加湖

泊的自我净化过程 (Szlauey 1996); Marine larena 等 (2001) 也发现, 在含有农业污水 (高负荷磷) 的人工溪流中, 由于底栖藻类的生长, 总磷含量快速降低; Jlbgen 等 (2004) 将聚丙烯人工基质放入富营养湖泊中, 发现底栖藻类群落能够从水体中去除磷并将其滞留到生物体中, 强化了水体的自净能力. 相对而言, 我国学者对底栖藻类在淡水生态系统中功能的研究起步较晚, 陈汉辉 (1999) 利用水网藻净化水源水质、王朝辉等 (1999) 利用水网藻去除富营养化水体中的氮、磷营养的研究均表明, 丝状绿藻能在污水中正常生长代谢, 并对水体中的磷具有较高的转化率和去除率; 马沛明等 (2005) 发现, 以丝状藻类为主的着生藻类处理系统对富营养化湖泊水体总磷的去除率达 79.6%. 但是, 这些研究仅限于实验室规模, 通过测定水体的总磷变化得到磷的去除率, 这与藻类对磷的实际滞留量存在一定的偏差. 所以, 原位天然底栖藻类群落对磷的滞留作用值得致力于基础生态功能和磷控制的科学工作者去详细调查, 有关底栖藻类群落在我国浅水富营养化水体磷循环中的作用也有待于系统了解和研究. 本研究中以富营养化的武汉东湖为代表, 拟调查底栖藻类群落在人工基质上建群发展为成熟群落过程中对磷的负荷能力和各组分磷的含量变化, 分析底栖藻类的生物量与磷滞留量的关系, 试图探寻底栖藻类在我国浅水富营养化水体修复中的潜在作用, 为研究底栖藻类在水体磷循环中的作用提供实验依据.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 人工基质的制备及样品的采集

用 15 cm × 8 cm × 1 cm 大小的花岗岩作为人工基质, 清洗后晾干, 在每个石块的一端粘贴尼龙绳, 在尼龙绳的自由端系上 eppendorf 管作为浮子, 在不同的绳长处打结, 以便测定人工基质在水体中所处的深度. 本研究在 2006 年的春季 (3~5 月), 武汉东湖的水果湖区域设立试验样点, 分别投入 80 块人工基质于沿岸带 40 cm 深的水中, 每隔 4 d 取 1 次样, 每次取样随机从水中取出人工基质 3~5 块, 放入样品收集袋, 贴好标签, 置于冰盒转移到实验室中; 同时取 1000 mL 上覆水样, 测定试验样点水体中的总磷及可溶性磷含量 (国家环保局, 2002). 试验持续至底栖藻类群落的生物量达到最高峰值并出

现下降趋势为止. 为了测定试验期间人工基质上自然沉积物的总磷 (TP) 及各组分磷的含量, 在试验开始后的第 2、18、34 d 分别投放 6 块人工基质于试验样点区域, 24 h 后取回人工基质上的自然沉积物样品.

2.2 样品的处理及各数量指标的测定

用硬毛牙刷将一定面积人工基质表面上的底栖藻类样品洗下, 定量到 200 mL, 分成 4 份: 一份用于测定底栖藻类的生物量 (Chlorophyll a Chl a), 约 20 mL 的样品用 90% 的丙酮溶液提取叶绿素测定 Chl a 的含量, 方法参照文献 (APHA, 1995); 一份约 50 mL 的藻样用于各组分磷含量的分析, 各组分磷的连续提取方法采用 SMT 测定法 (Ruban *et al* 1999), 将底栖藻垫中的磷分为 4 种, 即可溶性磷 (DP)、铁结合态磷 (Fe-P)、钙结合态磷 (Ca-P) 和有机态磷 (OP), 其中有机态磷采用硝酸-高氯酸法消解 (国家环保局, 2002), 各组分磷之和即为总磷 (TP); 一份约 20 mL 的样品保存于 5% 的福尔马林溶液中, 用于底栖藻类的鉴定; 剩下的样品用于测定无灰干质 (ash-free dry mass AFDM), 方法参照文献 (APHA, 1995). 自然沉积物样品的磷组分分析方法同底栖藻样, 不同时期自然沉积物的总磷含量等于每天自然沉降的 TP 量乘以建群时间, 结果中底栖藻垫的总磷含量已减去了同时期自然沉积物的总磷含量.

2.3 数据统计分析方法

采用 SPSS 11.0 统计软件对实验数据进行相关分析和差异显著性分析.

3 结果 (Results)

3.1 试验期间水体中 DR、TP 的变化及水柱中磷的自然沉降量

试验期间, 试验样点区域水体的总磷 (TP) 和可溶性磷酸盐 (DP) 的浓度分别在 0.194~0.112 和 0.076~0.031 mg L⁻¹ 之间波动 (表 1), 变化不大, 表明建群环境相对稳定. 样点区域水柱中平均每天自然沉降的 DR、Fe-P、Ca-P 和 O-P 浓度分别为 0.025、0.104、0.108 和 0.043 μg cm⁻². 水柱中磷的自然沉降量占藻垫总磷的相对百分含量随着底栖藻类群落的发展逐渐降低, 其相对含量在底栖藻类建群的中期就小于 1%, 故对底栖藻垫的磷分析影响不大.

表 1 试验期间水体中 DP、TP 的变化及水柱中磷的自然沉降量占藻垫总磷的百分含量

Table 1 DP and TP in the water column and percent of TP naturally sedimented in the benthic algal mat during the experiment

建群时间 /d	DP/ ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)	TP/ ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)	TP(自然沉降) / TP(底栖藻 + 自然沉降)
4	0.072	0.194	50.90%
8	0.055	0.168	6.30%
12	0.047	0.184	2.80%
16	0.031	0.134	2.01%
20	0.042	0.146	0.86%
24	0.031	0.112	0.38%
28	0.038	0.175	0.27%
32	0.035	0.168	0.33%
36	0.076	0.180	0.48%

3.2 建群期底栖藻类的生物量和总磷的动态变化

和对照(0d)相比,在建群的第8d人工基质已经被底栖藻类全部覆盖;随着群落的演替,到建群的第28d,人工基质上的底栖藻类已发展为成熟的顶级群落(图1);观察发现,底栖藻类的生物量随着群落的发展而连续积累。

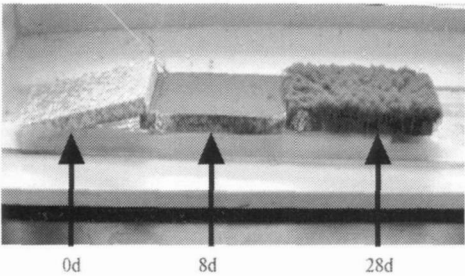


图 1 底栖藻类在人工基质上的建群过程

Fig. 1 Colonization process of benthic algae on artificial substrates

用底栖藻类的叶绿素 a(Chl a)和无灰干质(AFDM)的含量代表底栖藻类的生物量。试验期间,底栖藻类群落的 Chl a 和 AFDM 的动态变化趋势一致,底栖藻类生物量(Chl a)的变化表现为:在建群早期(0~16d),生物量缓慢增加;发展到指数生长期(16~28d),生物量迅速增加并在第28d达到最高峰值($54.5\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$);随后群落很快进入衰退期,生物量减少。建群期间,底栖藻垫的总磷含量与生物量(Chl a)动态变化显著相关,相关系数为 0.972(显著性水平 $\alpha = 0.01, n = 18$); TP 的含量随生物量变化而变化,在建群早期缓慢增加,随着底栖藻类生物量的迅速增加,藻垫的总磷含量也快速增加,并且和 Chl a 的含量同时达到最高峰值(96.7

$\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$),总磷含量也随着成熟群落生物量的减少而降低(图2)。

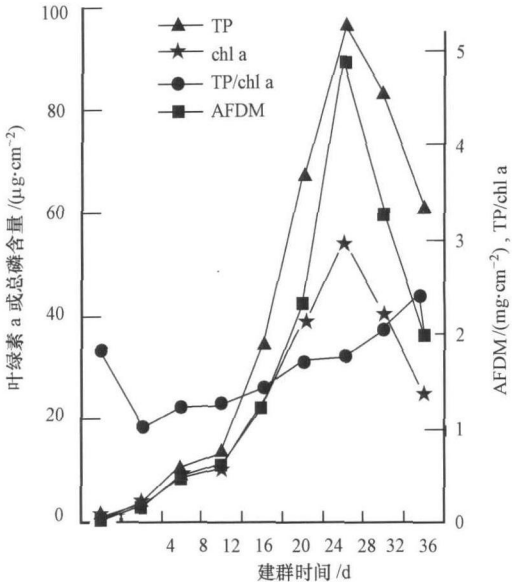


图 2 建群期底栖藻类的生物量和总磷的动态变化

Fig. 2 Variation of biomass and total phosphorus of benthic algae during colonization

图2也显示了 TP 与 Chl a 比值的变化情况。该比值的生物学意义为单位藻类生物量所负荷(滞留)的磷含量。在底栖藻类群落建群初期(0~16d), TP/Chl a 值从最开始的 1.83 降到 1.04。随着群落的发展, TP/Chl a 值开始缓慢地增加;即使在 28d 后,群落开始衰退,生物量和总磷浓度均开始降低时, TP/Chl a 仍然逐渐升高,在实验结束时,达到 2.43。此结果表明,随着底栖藻类生物量的增加,底栖藻垫对磷的滞留作用也增强,由于单位 Chl a 藻类细胞的总磷含量相对比较稳定,额外的磷滞留可能来自藻垫中的其它生物体、底栖藻类光合作用所导致的金属磷沉淀、藻垫对水体中颗粒态磷的过滤、截留底泥中释放的磷。

3.3 建群期底栖藻垫中各组分磷的动态变化

磷的分级提取结果显示,底栖藻垫中 DP、Fe-P、Ca-P 和 OP 的含量随着底栖藻类群落的发展而呈现出相似的变化规律: DP 和 Ca-P 变化趋势显著相关,相关系数为 0.900(显著性水平 $\alpha = 0.01, n = 18$),其含量明显随生物量变化而变化,均在第 28d 达到最高峰值(分别为 10.5 和 $56.1\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$); Fe-P 和 OP 动态变化的相关系数为 0.932(显著性水平 $\alpha = 0.01, n = 18$),虽然其最高含量(分别为 26.8 和 $16.3\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)出现的时间也在第 28d,但和 DP、Ca-P 相比,后者在底栖藻类发展为成熟群落前后

(28d), 含量变化幅度相对较小(图 3).

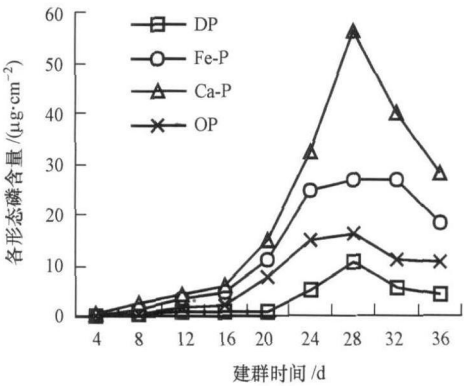


图 3 建群期底栖藻垫各组分磷含量的动态变化

Fig 3 Concentration of phosphorus fractions in the benthic algae mat during colonization

分析底栖藻垫中磷形态组成与总磷的比例关系后发现, 底栖藻类建群期间, 不同组分磷的百分含量差异显著, 其中 Ca-P 的百分含量最高, 可达总磷浓度的 40% ~ 54%; 其次是 Fe-P, 占总磷浓度的 24% ~ 34% 左右, 两者之和接近总磷浓度的 80% (第 4d 除外); OP 约占总磷浓度的 12% ~ 22%, DP 的百分含量最低, 不到总磷浓度的 10%.

3.4 底栖藻类群落的种类组成及其演替

对于东湖的底栖藻类群落来说, 绿藻类和硅藻类分别是 Chl b 和 Chl c 的贡献者, 用色素 Chl b/Chl a 和 Chl c/Chl a 的比值估算总生物量中绿藻和硅藻所占的比率(裴国凤, 2007). 图 4 显示, 建群早期的底栖藻类群落中, 硅藻对总生物量的贡献比绿藻大, 表明群落以硅藻占优势; 从指数生长期开始, 绿藻的比例开始增加, 并最终超过硅藻, 说明后期群落以绿藻占优势. 定性鉴定表明, 硅藻群落主要由变异直链藻 (*Melosira varians*)、异极藻 (*Gomphonema*

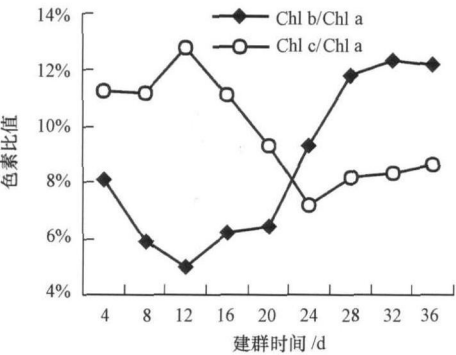


图 4 建群期底栖类 Chl b/Chl a, Chl c/Chl a 的比值变化

Fig 4 Chl b/Chl a Chl c/Chl a ratio in benthic algae during colonization

parvulum) 等优势种组成, 绿藻群落以团集刚毛藻 (*Cladophora glomerata*) 占绝对优势.

4 讨论 (Discussion)

4.1 底栖藻类群落的生物量 (Chl a) 与总磷的关系

Wetzel 等 (1996) 认为, 底栖藻类是基质和面源污染中营养物质释放到水体之前的重要吸收者, 在底栖藻类生物量较低的水体中总磷浓度是生物量较高水体的 10 倍左右; 当水流过底栖藻类占优势的试验性湿地后, 有 1/2 的总磷得到了去除 (Dodd, 2003), 这表明底栖藻类的生物量与磷的转移率有关. 在本试验中底栖藻类群落 TP/Chl a 比值的变化趋势表明: 实验初期出现高比值的原因在于建群早期藻垫没有形成, 其生物量 (Chl a) 很低, 总磷的绝大部分贡献来自水柱中的自然沉降颗粒; 随后藻垫迅速形成, 而自然沉降有限, 藻类的有机体成为总磷的主要贡献者, 所以 TP/Chl a 逐渐降低; 藻垫成熟后, 除直接转化为生物体的磷外, 对颗粒物的吸附过滤作用明显增强, 加上其它生物进入群落, 群落边缘藻类光合作用形成高 pH 环境也导致磷的直接沉淀, 因此, 单位生物量藻垫所负荷的磷逐渐增加. 实际上 TP/Chl a 值可能受到许多因素的影响, 第一, 由于实验中是用底栖藻类群落 Chl a 的含量代表生物量, 而低光照能够改变 Chl a 与 TP 之间的比率 (Jones *et al.*, 1987), 这种影响对底栖藻类群落是显而易见的, 由于藻垫厚度不同, 光照也会呈梯度变化 (Kuhl *et al.*, 1992); 第二, 群落的最大储磷能力与周围的营养水平有关, Portielje 等 (1994) 的研究表明, 单位干重底栖群落的最大储磷能力和外部的营养负荷水平呈正相关, 而和磷的吸收常数呈负相关, 当水体中的可利用磷增加时一些藻类具有吸收和储存磷的能力. Pietro (2006) 的研究也显示, 在水体磷浓度大于 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 藻垫的总磷含量在 $32.8 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的基础上继续增加, 但此时藻垫的磷储存能力并未达到饱和, 说明藻垫对磷的转移率与水体中的磷浓度是成比例的. 底栖群落的过量快速吸磷起到了缓冲剂的作用, 这种缓冲能力可以使点源污染区域的可溶性磷浓度迅速降低到较低的水平.

4.2 底栖藻类群落除去水体中磷的可能途径

首先, 底栖藻类群落在其生长过程中能大量吸收基质和水体中的可溶性磷酸盐组成自身有机体, 将磷滞留到生物量中, 加速了磷向沉积物的流动

(Dodd 2003). 有研究表明, 磷随着底栖藻类在人工基质上的生长而得到积累, 如聚丙烯人工基质上底栖藻类的总磷含量可以达到 $10 \mu\text{g cm}^{-2}$ (Jørgensen *et al.*, 2004); 本研究中底栖藻类的总磷浓度相对较高 (最高达 $72.25 \mu\text{g cm}^{-2}$), 可能与东湖底栖藻类的生物量较高有关. 东湖底栖藻类滞留的总磷浓度甚至和一些水生植物相当, 例如, Kufel 等 (1994) 发现, 波兰的 Luknajno 湖底的 *Chara* spp. 总磷浓度为 $80 \mu\text{g cm}^{-2}$. 此外, 底栖藻类群落的光合作用所导致的 pH 升高可以增加对磷的化学沉淀 (Dodd 2003).

其次, 底栖藻类对水体中的悬浮颗粒物具有良好的沉淀和过滤作用, 从而减弱了沉积物中磷的水平转移和转化. 底栖藻类群落可以通过增加水在藻垫的滞留时间来减慢溶解性营养物质水平运输的速度, 藻垫中的松散丝状藻类群体还具有良好的过滤作用, 可以为去除水体的悬浮颗粒物提供很大的表面积, 直接影响着水体中悬浮颗粒物的移动, 一旦这些颗粒物被保持在底栖藻类生物体中, 就会沉降到沉积物上. 例如, 在一个中型静水水体中, 底栖丝状绿藻中浮游植物的密度是上覆水体的 100 倍 (Stevenson *et al.*, 1996). 尤其在像东湖这样的浅水富营养湖泊, 风浪导致含有生物活性磷的颗粒物质的再悬浮是一种普遍现象, 颗粒物质的过滤就显得尤为重要; 除夏季外, 东湖沿岸带底栖藻类的生物量始终较高, 其中丝状绿藻占较大优势 (裴国凤等, 2007), 这说明底栖藻类的沉淀和过滤作用可能是导致东湖水体中磷滞留的原因之一. 而覆盖在沉积物表面的底栖藻类, 还能截获底泥和基质中释放的磷, 减缓了水体中磷含量的增加, 进而减少浮游植物的数量; 底栖藻类所处微生境中的营养物质比浮游植物生境中的营养物质要集中得多, 其代谢活性也明显强于后者, 如附生有底栖藻类的沉积物间隙水中溶解性营养物质的浓度要比沉积物上覆水中的大 100~1000 倍 (Biggs 1996). 因此, 底栖藻类群落在减缓水底沉积物磷的释放中扮演了重要角色. 底栖藻类群落还为许多其它水生生物 (细菌、真菌、底栖动物等) 提供了重要的生存环境和必要的栖息场所, 这些非藻生物也为总磷浓度的增加作出了相当的贡献.

4.3 底栖藻垫中各组分磷的含量

除滞留在生物量中的磷外, 底栖藻类还明显影响着金属磷的沉积. 碱性沉积以钙镁磷为主

(Wetzel 2001). 若上覆水体缺氧, 例如大量的底栖藻类死亡或遭遇低光照, 呼吸作用可能会造成厌氧环境, 此时沉积物中大量金属磷和有机磷化合物都会释放进入水体 (Golterman, 1995), 高 pH 值会增强钙磷化合物的沉积和碳酸盐的沉淀. 底栖藻类的光合作用会增加沉积物表面的 pH 值, 从而增加钙磷化合物的形成. 底栖藻类光合作用也与铁磷的沉积增加有关 (Dittrich *et al.*, 2000). 这些因素可能是影响本试验中底栖藻垫的 Ca-P、Fe-P 百分含量相对较高的原因之一. 造成有机磷百分含量较低的原因可能是藻垫沉积物中的有机磷在微生物的作用下转变为无机磷, 在磷的连续提取中有机磷也可能被水解进入无机磷的提取液中.

底栖藻垫中的每一个种类都会对资源的可利用性做出相应的反应, 故藻垫对磷滞留能力的大小明显受到底栖藻类种类组成的影响 (McComick *et al.*, 2006). 例如, Stevenson 等 (1996) 报道了在休伦湖含磷较高的水体区域, 附着生长在刚毛藻上的一些藻类富含多聚磷酸盐小体. 研究表明, 丝状藻类消耗了可利用磷源的 85% (Wetzel 2001), 这对降低水体的富营养化水平、增加水体透明度、稳定生态系统和水生高等植物的恢复等具有十分重要的作用.

5 结论 (Conclusions)

1) 建群期间, 底栖藻类的生物量和总磷含量显著相关, 两者同时也在第 28d 达到最高峰值 ($\text{Chl a} = 54.5 \mu\text{g cm}^{-2}$; $\text{TP} = 96.7 \mu\text{g cm}^{-2}$); 底栖藻类对磷的滞留作用随着底栖藻类生物量的增加而增强 (最高达 $2.43 \mu\text{g cm}^{-2}$).

2) 底栖藻垫中总磷的 80% 由百分含量相对较高的钙磷、铁磷组成, 有机磷、可溶性磷的含量相对较低.

3) 藻垫滞留的磷包括藻垫中藻细胞和其它生物的组成性磷、藻类光合作用过程中所沉淀的金属磷、藻垫过滤水体中的颗粒态磷和截留底泥中释放的磷.

责任作者简介: 刘国祥 (1970—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事淡水藻类系统分类学与生态学研究, 发表论文 30 余篇.

参考文献 (References):

- APHA. 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (19th edn). [M]. Washington DC: American Public

- Health Association
- Biggs B J E. 1996 Patterns in benthic algae of streams in Stevenson R J Bothwell M L, Lower R L, Algal Ecology[M]. San Diego Academic Press 31—56
- 陈汉辉. 1999 冬季水网藻对水源水的净化能力 [J]. 上海环境科学, 23: 18—20
- Chen H H. 1999 Decontaminative capacity of *Hydractylon reticulatum* on source water [J]. Shanghai Environmental Sciences 23: 18—20 (in Chinese)
- Dittrich M, Casper P, Koschel R. 2000 Changes in the porewater chemistry of profundal sediments in response to artificial hypolimnetic calcite precipitation [J]. Archives Hydrobiology Special Issues Advance L in ology 55: 421—432
- Dodds W K. 2003 The role of periphyton in phosphorus retention in shallow freshwater aquatic system [J]. Journal Phycology 39: 840—849
- Golteman H L. 1995 The role of the iron hydroxide phosphate-sulphide system in the phosphate exchange between sediments and overlying water [J]. Hydrobiologia 297: 43—54
- Jørgen A M, Palm A, Mekonian M. 2004 Phosphorus removal from eutrophic lakes using periphyton on submerged artificial substrata [J]. Hydrobiologia 528: 123—142
- Jones R I, Inavirta V. 1978 Vertical and seasonal variation of phytoplankton photosynthesis in a brown water lake with winter ice cover [J]. Freshwater Biology 8: 561—572
- Kufel L, Ozimek T. 1994 Can chara control phosphorus cycling in Lake Lukna jno (Poland) [J]. Hydrobiologia 276: 277—283
- Kuhl M, Jørgensen B B. 1992 Spectral light measurements in microbial phototrophic communities with a fiberoptic microprobe coupled to a sensitive diode-array detector [J]. Limnology and Oceanography 37: 1813—1823
- Liboriussen L, Jeppesen E. 2006 Structure, biomass, production and depth distribution of periphyton on artificial substratum in shallow lakes with contrasting nutrient concentrations [J]. Freshwater Biology 51: 95—109
- 马沛明, 况琪军, 刘国祥, 等. 2005 底栖藻类对氮磷去除效果研究 [J]. 武汉植物学研究, 23: 465—469
- Ma P M, Kuang Q J, Liu G X, et al. 2005 Study on removal efficiency of nitrogen and phosphorus by freshwater benthic algae [J]. Journal of Wuhan Botanical Research 23: 465—469 (in Chinese)
- Marinelarena A J, Giorgi H D. 2001 Nitrogen and phosphorus removal by periphyton from agricultural wastes in artificial streams [J]. Journal of Freshwater Ecology 16: 347—353
- McComick P V. 2006 Periphyton as a potential phosphorus sink in the Everglades Nutrient Removal Project [J]. Ecological Engineering 27: 279—289
- 裴国凤, 刘国祥, 胡征宇. 2007 东湖沿岸带底栖藻类群落的时空变化 [J]. 水生生物学报, 31(6): 836—842
- Pei G F, Liu G X, Hu Z Y. 2007 Spatial and temporal variation of benthic algae communities in the littoral zone of lake Donghu [J]. Acta Hydrobiologica Sinica 31(6): 836—842 (in Chinese)
- 裴国凤, 刘国祥, 胡征宇. 2008 云南高原湖泊沿岸带底栖藻类群落的分布 [J]. 武汉植物学研究, 26: 373—378
- Pei G F, Liu G X, Hu Z Y. 2008 Benthic algal communities distribution in the littoral zone of Yunnan plateau lakes [J]. Journal of Wuhan Botanical Research 26: 373—378 (in Chinese)
- Pietro K C. 2006 Phosphorus removal by the ceratophyllum / periphyton complex in a south Florida (USA) freshwater marsh [J]. Ecological Engineering 27: 290—300
- Portielje R. 1994 Kinetics of luxury uptake of phosphate by algae dominated benthic communities [J]. Hydrobiologia 275: 349—358
- Rubán V, Lopez-Sanchez J F, Pardo P, et al. 2001 1999. Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments A synthesis of recent works [J]. Fresenius Journal of Analytical Chemistry 370: 224—228
- 国家环境保护总局. 2002 水和废水监测分析方法 (第4版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 102—208
- State Environmental Protection Administration of China. 2002 The methods to monitor and analyze water wastewater (Fourth edition) [M]. Beijing: Chinese Environment Science Press 102—208 (in Chinese)
- Stevenson R J, Bothwell M L, Lower R L, et al. 1996. Algal Ecology [M]. San Diego Academic Press 10—26
- Szlauer L, Szlauer B. 1996 An attempt to manipulate a lake by deploying polyethylene sheets [J]. Polskie Archiwum Hydrobiologii 43: 311—321
- 王朝辉, 江天久, 纪桑, 等. 1999 水网藻对富营养化水样中氮磷去除能力的研究 [J]. 环境科学学报, 19(4): 448—452
- Wang Z H, Jiang T J, Qi S, et al. 1999. Studies on nitrogen and phosphorus removal capacity of *Hydractylon reticulatum* in eutrophic freshwater samples [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 19(4): 448—452 (in Chinese)
- Wetzel R G, Pickard D. 1996 Application of secondary production methods to estimates of net aboveground primary production of emergent aquatic macrophytes [J]. Aquatic Botany (Aquat Bot), 53(2): 109—120
- Wetzel R G. 2001 Limnology: Lake and River Ecosystems (3rd ed) [M]. San Diego CA: Academic Press 1006