

绿潮藻类暴发对天鹅湖水体和沉积物磷含量的影响

魏权, 邵雪琳, 高丽*

烟台大学海洋学院, 山东 烟台 264005

摘要: 在荣成天鹅湖藻类暴发区域采集新鲜沉积物和丝状硬毛藻 (*Chaetomorpha* spp.), 进行室内模拟试验, 监测了生长过程中硬毛藻的生物量、磷富集量以及不同处理水体总磷 (TP) 和可溶性磷 (SRP) 质量浓度的变化, 并分析了藻类生长对沉积物中各形态磷含量的影响。结果表明, 当水体磷含量较高时, 硬毛藻生长较快, 相对生长速率高达 14.88%, 之后随着水体磷浓度的下降, 生长速率逐渐减小。不同处理间硬毛藻的生物量相差很大, 高磷含量处理显著高于低磷处理, 最大差值可达 26.50 g。随着藻类的生长, 水体 TP 和 SRP 含量明显降低, 其中高磷含量处理的 TP 质量浓度由 0.93 mg·L⁻¹ 降至 0.01 mg·L⁻¹, 低磷含量处理水体 SRP 质量浓度均降至 0.006 mg·L⁻¹ 以下。当水体磷含量降至一定水平, 沉积物中磷可向水体释放, 其中可还原态磷和铁铝结合态磷的降幅分别为 23.98% 和 12.61%。在高磷含量处理组, 藻体中磷的富集量显著升高, 且当水体磷含量相同的条件下, 有沉积物处理的富集量显著高于无沉积物处理。相关分析表明, 藻体生物量与水体 TP 和 SRP 的相关性较好, 其中高磷含量处理组生物量与水体 TP、SRP 呈高度负相关, 而相对生长速率与之呈显著正相关。结果说明, 水体及沉积物中磷均可作为硬毛藻生长的营养来源; 另一方面, 藻类生长可明显降低水体磷含量, 并促进沉积物中磷的释放。

关键词: 硬毛藻 (*Chaetomorpha*); 藻类暴发; 磷含量; 水体; 沉积物

中图分类号: X524

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2014) 01-0139-06

引用格式: 魏权, 邵雪琳, 高丽. 绿潮藻类暴发对天鹅湖水体和沉积物磷含量的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(1): 139-144.

WEI Quan, SHAO Xuelin, GAO Li. Effects of macroalgal blooms on phosphorus concentrations in water and sediments of Rongcheng Swan Lake [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(1): 139-144.

近年来, 水体富营养化现象日益严重, 藻华频繁暴发, 如发生在淡水湖泊的蓝藻水华以及近海海域的绿潮 (Prasad 和 Ramanathan, 2010; Lehman, 2011)。绿潮的主要生物种类有浒苔属 (*Enteromorpha*)、硬毛藻属 (*Chaetomorpha*)、刚毛藻属 (*Cladophora*) 以及石莼属 (*Ulva*) 等大型海藻 (Bala 等, 2010; Yabe, 2009)。国内外研究表明, 当水体磷含量较高时, 大型丝状绿藻对水体中磷有较强的吸收和富集能力, 在污水处理过程中对磷的富集率达 80% 以上 (况琪军等, 2004; 梁霞和李小平, 2008; 雷国元, 2009)。当水体营养盐含量较低时, 沉积物也可作为藻类生长的营养源之一 (Roy 等, 2012)。Kamer 等 (2004) 对沉积物磷释放机制的研究表明, 在水体磷含量较低时, 沉积物中磷以间隙水为介质, 通过表面扩散层向上覆水体扩散迁移, 从而促进藻类的生长。刘冬梅 (2013) 和 Zhu (2013) 等对太湖浮游蓝藻的研究也发现, 蓝藻生长能有效利用水体及沉积物中磷。此外, 藻类在生长、衰亡及季节交替过程中, 通过光合、呼吸、残体分解等作用, 可使水体环境发生明显改变

(如溶解氧、pH 等), 进而影响沉积物中营养盐的释放 (Zhu 等, 2008; 张强和刘正文, 2010; Garcia 和 Corzo, 2011)。因此, 藻类暴发过程中, 磷在水体、沉积物和藻体中的生物地球化学行为是当前水环境研究的热点之一。目前, 有关藻类生长对水体-沉积物界面营养盐迁移的影响研究, 多集中于浮游微藻, 而大型绿潮藻类——硬毛藻的报道较少 (Menendez 等, 2002; 侯金枝等, 2012)。

荣成天鹅湖位于山东半岛最东端——荣成市的马山和成山镇之间, 又名月湖, 是中国北方最为完整的典型天然纳潮泻湖。荣成天鹅湖湿地是亚洲最大的天鹅越冬栖息地, 已被列为国家级大天鹅自然保护区。近些年来, 由于人类活动 (滩涂养殖、大量排污、围滩清淤等) 的强烈干预, 生态环境恶化, 绿潮频繁暴发。每年的 5-9 月份, 在湖的西部和北部会滋生大量硬毛藻 (*Chaetomorpha* spp.) (王友爱和李平, 2009), 在水底形成 20~30 cm 厚度的覆盖层, 严重影响了水体环境和渔业生产。本文通过室内模拟的方式, 初步探讨了水体磷水平对硬毛藻生长的影响, 分析了沉积物对上覆水体营养盐的

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41273130; 40801084)

作者简介: 魏权 (1988 年生), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为湿地生源要素磷的循环。E-mail: weiquan0618@126.com

*通讯作者: 高丽。E-mail: ligao117@126.com

收稿日期: 2013-09-28

缓冲作用,旨在阐明大型藻类生长对水-土界面磷迁移的影响,从而为天鹅湖沉积物内源污染的控制和绿潮藻类的防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

2013年4月,在天鹅湖硬毛藻爆发的区域(N37°21.447', E122°34.301')采集生长良好的硬毛藻和表层湖水,利用抓斗式采样器采集表层沉积物(0~10 cm)。沉积物样品充分混匀,并去除植物根系、贝壳等杂质,装入聚乙烯袋中避光冷藏保存(2℃);分析其理化性质:pH为5.14,总磷430 mg·kg⁻¹。硬毛藻去除附着藻类后,用湖水洗净,室内预培养1周左右,之后选择生长一致,健康良好的植株进行培养试验;同时测定藻体的含水量以及磷含量。湖水过滤煮沸,以消除微生物影响,水体pH为8.07,总磷和可溶性磷质量浓度分别为0.08和0.01 mg·L⁻¹,总氮和硝态氮分别为0.57和0.35 mg·L⁻¹。湖水设置低营养盐含量和高营养盐含量两个处理,低磷含量为不人为添加氮磷,高磷含量湖水用磷酸二氢钾和硝酸钾配置,其中总磷、可溶性磷的质量浓度分别为0.93和0.85 mg·L⁻¹,总氮为6.72 mg·L⁻¹。

1.2 试验设计

根据藻类生长的特点,模拟试验于4~5月在室内进行,实验容器为5 L的聚乙烯桶($d=14.5$ cm, $h=24$ cm)。试验共设5个处理,3次重复,试验处理分别为:藻+低磷含量湖水(A+IW)、藻+高磷含量湖水(A+HW)、藻+低磷含量湖水+沉积物(A+IW+S)、藻+高磷含量湖水+沉积物(A+HW+S)、低磷含量湖水+沉积物(IW+S)。

具体操作:准确称取500 g新鲜沉积物,将其均匀平铺于聚乙烯桶底部,然后缓慢注入3 L过滤煮沸的湖水,之后加入10 g(鲜质量)硬毛藻;聚乙烯桶外侧底部覆黑纸用以遮光。试验过程中,定期在距水土界面3 cm处吸取水样(前7 d每日取样,之后每2 d取样1次),测定藻体生物量(每3 d测定一次),且每次取样后补充相同体积的试验湖水。试验结束时测定新鲜沉积物中磷的赋存形态。试验过程保持室温20℃,自然光照,强度为150~200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,24 h通气,周期为30 d。

1.3 分析方法

上覆水总磷:过硫酸钾消煮后,钼锑抗分光光度法测定;可溶性总磷:水样过滤后用过硫酸钾消煮,然后钼锑抗分光光度法测定;可溶性磷:水样过滤后,用钼锑抗分光光度法测定(国家环境保护总局,2002)。

藻类生物量:活藻用吸水纸吸干后,用电子天

平称量(精确至0.01 g);藻体含磷量:H₂SO₄-H₂O₂消煮后,用钼锑抗分光光度法测定。

沉积物磷形态的测定:采用连续提取法(Huofen等,1999)。依次用1.00 mol·L⁻¹ NH₄Cl、0.10 mol·L⁻¹ NaHCO₃/Na₂S₂O₄、0.10 mol·L⁻¹ NaOH和0.50 mol·L⁻¹ HCl提取,分别得到弱结合态磷(NH₄Cl-P)、可还原态磷(BD-P)、铁铝结合态磷(NaOH-P)和钙结合态磷(HCl-P)。沉积物含水量:105℃烘至恒质量。

1.4 数据处理

藻体相对生长速率(RGR)的计算(姜宏波等,2009):

$$\text{RGR} = \frac{\ln W_t - \ln W_0}{t} \times 100\%$$

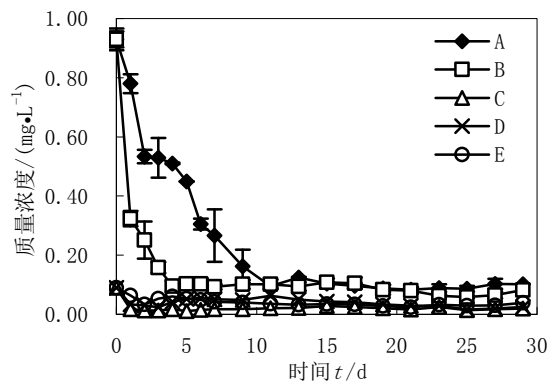
式中: W_0 为初始藻的鲜质量(g); W_t 为试验结束时藻的鲜质量(g); t 为试验持续的时间(d)。

统计分析在SPSS 17.0软件中进行,用Turkey HSD检验比较了不同处理间各指标的差异性,并对总磷、可溶性磷及藻体生物量进行了相关性分析(Pearson's correlation)。

2 结果与分析

2.1 硬毛藻生长过程中水体磷含量的变化

由图1所示,前期(第0~10天)各处理水体初始TP含量较高,硬毛藻增长迅速,TP含量也随之迅速下降,高磷含量处理下降速率达0.10~0.25 mg·L⁻¹·d⁻¹。其中,第4天时,A+HW处理中的TP含量显著高于A+HW+S处理($P<0.05$);但低磷含量处理中,A+IW处理TP质量浓度显著高于A+IW+S($P<0.05$),表明沉积物对上覆水体中的磷具有一定的缓冲作用(图1)。试验中期(第11~25天)各处理TP质量浓度变化不大,变幅为0.002~0.06 mg·L⁻¹,其中高磷含量处理组显著高于低磷含量处理组($P<0.01$)。在试验后期(第26~30



A: A+HW B: A+HW+S C: A+IW D: A+IW+S E: IW+S

图1 上覆水总磷的含量变化

Fig.1 Changes of total P concentrations in overlying water

天) 各处理磷质量浓度有略微上升趋势, 可能是由于此阶段藻体生长速率低于衰亡藻体分解速率, 藻体分解向水体中释放磷所致(侯金枝等, 2013)。

上覆水中的可溶性磷(SRP)变化趋势同TP相似(图2)。试验前期(第0-11天), 随藻体生长, SRP含量迅速下降; 在高磷含量处理组中, 有沉积物处理与无沉积物处理间存在极显著差异($P<0.01$)。至试验中期(第12-24天), 各处理SRP含量基本稳定, 其中低磷含量处理组中无沉积物处理降至 $0.001\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 而有沉积物处理为 $0.006\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在试验后期(第25-30天), 各处理磷含量均有小幅度上升, 且IW+S处理SRP质量浓度高于其它处理。

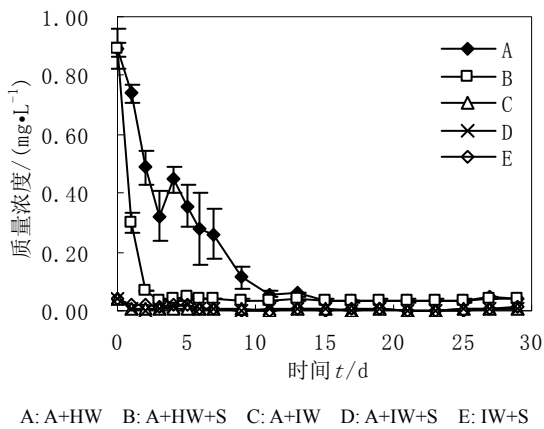


图2 上覆水可溶性磷的含量变化
Fig. 2 Changes of soluble reactive P concentrations in overlying water

2.2 不同处理条件下硬毛藻生物量的变化

图3可见, 不同处理间硬毛藻的生物量相差很大, 其中高磷含量处理明显高于低磷处理, 最大差值可达 26.50 g 。在第4-12天期间, 藻生长的最快, A+HW+S与A+HW处理的相对生长速率显著高于A+IW处理($P<0.05$)(表1)。第15天时, 硬毛藻的生物量最高可达 36.24 g , 各处理的生物量变化在 $10.28\sim 26.24\text{ g}$ 之间; 之后硬毛藻生长缓慢, 各处理相对生长速率表现为 $A+HW+S>A+HW>A+IW+S>A+IW$ 。试验进行20d后, A+IW处理中出现死亡植株, 藻体变白, 而在有沉积物的低磷含量处理中植株出现大量断枝。

2.3 硬毛藻植株含磷量的差异

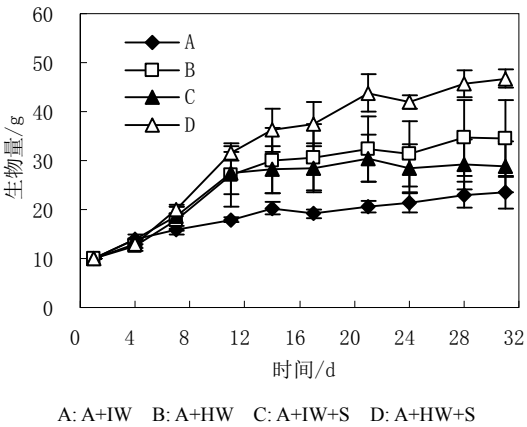


图3 硬毛藻生物量的动态变化
Fig. 3 Dynamic variation of *Chaetomorpha* biomass

由图4可知, 试验结束时各处理藻体磷的富集量表现为: $A+HW+S>A+HW>A+IW+S>$ 原始藻 $>A+IW$, 其中高磷含量处理与低磷含量处理的差异达极显著水平($P<0.01$), 说明水体磷含量对藻体磷富集量有显著影响。在相同磷含量水体中, 有沉积物处理的富集量明显高于无沉积物处理, 且A+IW+S处理明显高于原始藻, 表明沉积物的存在促进了藻体对水体中磷的富集。

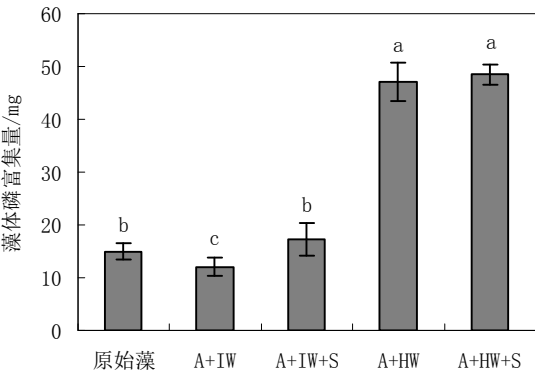


图4 不同处理藻体磷富集量差异
Fig. 4 The differences of P enrichment quantity in algae among different treatments

2.4 沉积物中各形态磷的含量变化

试验前后沉积物中各形态磷的变化如图5所示, 弱结合态磷($\text{NH}_4\text{Cl-P}$)质量分数在试验前后始终较低, 各处理变化在 $0.14\sim 0.38\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,

表1 不同处理硬毛藻的相对生长速率

Table 1 Relative growth rates of <i>Chaetomorpha</i> at different treatments					%
时间	藻+低磷含量湖水	藻+高磷含量湖水	藻+低磷含量湖水+沉积物	藻+高磷含量湖水+沉积物	
第0-4天	11.19±0.37	7.44±0.28	10.78±0.37	8.45±0.57	
第5-11天	4.13±0.17	12.56±1.71	11.33±0.63	14.88±1.64	
第12-21天	1.50±0.67	2.05±0.65	1.15±0.02	3.64±1.12	
第22-30天	1.45±0.12	0.67±0.58	0.68±0.09	0.75±1.23	

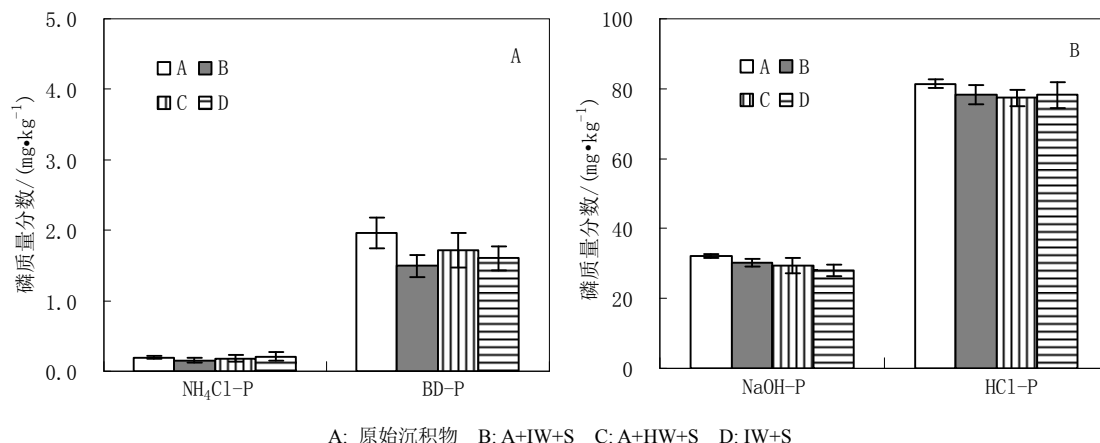


图5 沉积物中各磷形态的含量变化

Fig.5 The changes of different P forms in sediments

与初始含量差异不大。可还原态磷(BD-P)初始质量分数为 $1.96 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 试验结束时各处理均极显著降低 ($P < 0.01$), 其中 A+IW+S 与 A+HW+S 处理分别降至 1.71 和 $1.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 5A)。就铁铝结合态磷(NaOH-P)而言, A+IW+S 处理含量最低, 降幅为 12.61% , 与初始沉积物间差异显著 ($P < 0.05$), A+HW+S 与 A+IW+S 处理降幅分别为 8.47% 和 5.97% 。钙结合态磷(HCl-P)含量在各处理中均有所降低, 最大降幅为 5.00% , 各处理间差异不显著 ($P > 0.05$)。

3 讨论

3.1 水体磷含量对硬毛藻生长的影响

水体中磷的含量及赋存形态受到藻类的生长吸收、沉积物对磷的吸附/解吸作用等因素影响 (Peckol 等, 1994)。周培疆 (2001)、宋关玲等 (2007) 研究发现, 斜生栅藻及普通小球藻生长均可使上覆水中磷含量明显下降; Eiji (2006)、高丽等 (2009) 发现上覆水中磷降低到一定含量时, 沉积物对磷的吸附量很低或呈负吸附状态。本试验中, 硬毛藻主要通过吸收上覆水中的磷来维持自身的生长, 最终使各形态磷含量保持较低水平, 其中对 SRP 的影响最为明显。在试验前中期 (第 0-14 天), 生物量增长表现为 $A+HW+S > A+HW > A+IW+S > A+IW$, 而 TP 变化为 $A+HW > A+HW+S > A+IW+S > IW+S > A+IW$, 变化较明显的 A+HW+S 处理中生物量与 TP 呈极显著相关 ($r = -0.793^{**}$)。表明上覆水中 TP 含量过高时, 硬毛藻大量吸收水体中磷, 相对生长速率较大, 生物量迅速增长; 此时沉积物也会对上覆水中高含量的磷有一定吸附作用。

水体中 SRP 为藻体利用的主要形态, 当 SRP 含量减少时, 其他形态的磷会在磷酸酶的作用下转化为藻体可利用磷, 最终影响水体中磷的赋存形态 (晁建颖等, 2011)。在第 0-10 天, A+HW 处理的

TP 与 SRP 呈极显著的正相关关系 ($r = 0.999^{**}$), 此时水体的颗粒态磷、有机磷等会转变为 SRP 供藻体利用, 藻体生物量随着水体 SRP 质量浓度上升而增加。当磷含量降到较低水平时 (第 14-30 天), 除 A+HW+S 处理外, 其余 3 个处理后期生长逐渐趋于停止, A+HW+S 处理的生物量与 A+IW 处理、A+IW+S 处理间差异显著 ($P < 0.05$)。可见沉积物、湖水磷含量均与生物量关系密切, 沉积物可在湖水营养盐含量较高时对水体营养盐产生吸附净化作用, 而在湖水营养盐含量低时可自身缓慢释放营养盐, 从而促进藻类的生长 (图 1, 图 6)。

3.2 硬毛藻生长对沉积物中磷含量及形态的影响

国内外研究发现, 沉积物具有水体中磷的“源汇”双重功能。当湖泊水体磷质量浓度低于 $0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 沉积物中的磷才被释放; 当水中磷质量浓度为 $0.09 \sim 0.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 水中的磷会向沉积物迁移 (Perrone 等, 2008; 宋鹏鹏等, 2011)。Menendez 等 (2002) 在对氮磷供给对硬毛藻生长影响的研究中发现, 藻体生长能有效利用沉积物中赋存的氮磷。Komatsu 等 (2006) 在浒苔生长与沉积物和水体营养盐关系的研究中发现, 沉积物可为大型藻类的生长提供营养, 沉积物中总磷的含量与上覆水中磷的含量关系密切。本试验中, 硬毛藻的生长明显降低了上覆水中磷含量, 从而促进沉积物中内源磷的释放, 使得各处理中沉积物的磷含量较初始状态均有所下降; 各形态中, BD-P 与 NaOH-P 的含量变化相对明显, 其中 BD-P 与初始含量差异达显著水平 ($P < 0.05$)。宋康等 (2012) 研究表明, 沉积物中 BD-P 较易受到水生植物和藻类的影响, 水生植物菹草能显著影响沉积物中 BD-P 与 NaOH-P 的含量, 这与本试验结果相符。

由上可见, 沉积物中 BD-P 和 NaOH-P 具有较高的活性, 在硬毛藻大量生长区域, 水体 pH 会发

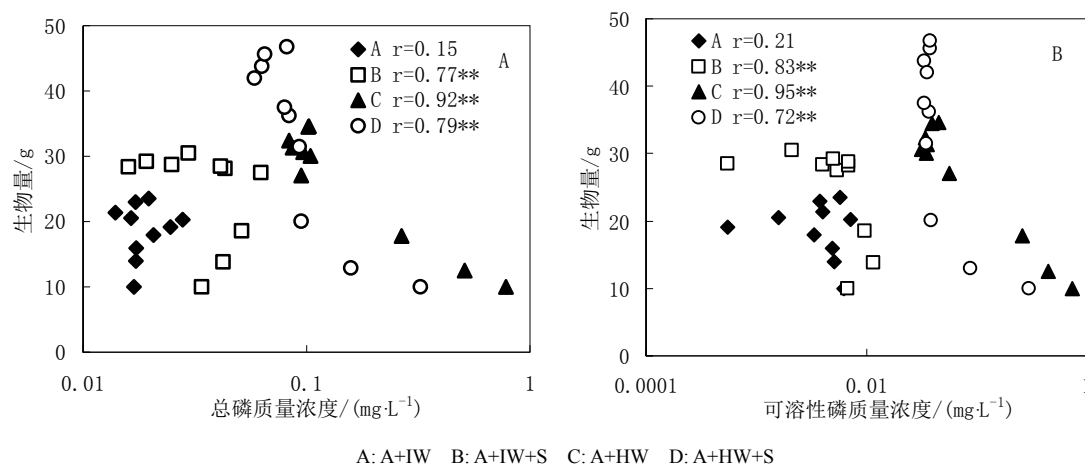


图6 水体磷含量与藻类生物量的相关性

Fig. 6 Correlations between P concentration in water and algal biomass

生变化,沉积物-水界面磷含量梯度增大,沉积物累积的磷会向上覆水体释放,并被藻体利用。总体来说,沉积物的存在促进了硬毛藻生长,并提高了藻体磷的富集量。本试验仅在室内模拟进行,不能完全模拟自然环境,如风浪对沉积物的搅动影响,因而可能缩小了硬毛藻生长对沉积物中磷含量及赋存形态的影响。在天然的湖泊河流中,硬毛藻可能对沉积物中磷的赋存形态产生一定的影响,有待于进一步研究。

4 结论

1) 当水体中磷含量较高时,大量暴发的硬毛藻可迅速吸收、富集水体中磷;且随水体磷含量的增加,藻体中磷的富集量增大。藻的生物量与水体磷含量呈显著的负相关关系。在水体富营养化的区域,可种植适量的硬毛藻来降低水体中磷的含量。

2) 水体及沉积物中的磷均可作为硬毛藻生长的营养来源,绿潮暴发使上覆水磷含量迅速降低,促进沉积物中磷的释放,使得沉积物各形态磷含量下降,其中可还原态磷变化较明显。

参考文献:

- GARCIA R E, CORZO A. Effects of macroalgal blooms on carbon and nitrogen biogeochemical cycling in photoautotrophic sediments: An experimental mesocosm[J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, 62(7): 1550-1556.
- GUBELIT Y L, BEREZINA N A. The causes and consequences of algal blooms: the *Cladophora glomerata* bloom and the Neva estuary (eastern Baltic Sea)[J]. Marine Pollution Bulletin, 2010, 61(4-6): 183-188.
- HUPFER M, GACHTER R, GIOVANOLI R. Transformation of phosphorus species in settling seston and during early sediment diagenesis[J]. Aquatic Sciences, 1995, 57(4): 305-324.
- KAMER K, FONG P, KENNISON R L, SCHIFF K. The relative importance of sediment and water column supplies of nutrients to the growth and tissue nutrient content of the green macroalga *Enteromorpha intestinalis* along an estuarine resource gradient[J].

Aquatic Ecology, 2004, 38(1): 45-56.

- KOMATSU E, FUKUSHIMA T, SHAIRAISHI H. Modeling of P-dynamics and algal growth in a stratified reservoir—mechanisms of P-cycle in water and interaction between overlying water and sediment[J]. Ecological Modelling, 2006, 197(3): 331-349.
- LEHMAN J T. Nuisance cyanobacteria in an urbanized impoundment: interacting internal phosphorus loading, nitrogen metabolism, and polymixis[J]. Hydrobiologia, 2011, 661(1): 277-287.
- MENENDEZ M, HERRERA J, COMIN F A. Effect of nitrogen and phosphorus supply on growth, chlorophyll content and tissue composition of the macroalga *Chaetomorpha linum* (O.F. Mull), Kutz, in a Mediterranean Coastal Lagoon[J]. Scientia Marina, 2002, 66(4): 355-364.
- PECKOL P, DEMEO A B, RIVERS J, et al. Growth, nutrient uptake capacities and tissue constituents of the macroalgae *Cladophora vagabunda* and *Gracilaria tikvahiae* related to site-specific nitrogen loading rates[J]. Marine Biology, 1994, 121(1): 175-185.
- PERRONE U, FACCH I A, SACCHI E. Phosphorus dynamics in a small eutrophic Italian lake[J]. Water Air Soil Pollut, 2008, 189(1-4): 335-351.
- PRASAD M B K, RAMANATHAN A L. Characterization of phosphorus fractions in the sediments of a tropical intertidal mangrove ecosystem[J]. Wetlands Ecology and Management, 2010, 18(2): 165-175.
- ROY E D, NGUYEN N T, BARGU S, et al. Internal loading of phosphorus from sediments of Lake Pontchartrain (Louisiana, USA) with implications for eutrophication[J]. Hydrobiologia, 2012, 684(1): 69-82.
- YABE T, ISHII Y, AMANO Y, et al. Green tide formed by free-floating *Ulva* spp. at Yatsu tidal flat, Japan[J]. Limnology, 2009, 10(3): 239-245.
- ZHU G W, WANG F, ZHANG Y L, et al. Hypoxia and its environmental influences in large, shallow, and eutrophic Lake Taihu, China[J]. International Association of Theoretical and Applied Limnology-Proceedings, 2008, 30(3): 361-365.
- ZHU M Y, ZHU G W, LI W, et al. Estimation of the algal-available phosphorus pool in sediments of a large, shallow eutrophic lake (Taihu, China) using profiled SMT fractional analysis[J]. Environment Pollution, 2013, 173: 216-223.
- 晁建颖, 高光, 汤祥明, 等. 风浪扰动中太湖 OA 对水体磷循环影响的原位实验研究[J]. 环境科学, 2011, 32(10): 123-128.
- 高丽, 史衍玺, 孙卫明, 等. 荣成天鹅湖湿地沉积物对磷的吸附特征及影响因子分析[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 162-166.

- 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002, 243-249.
- 侯金枝, 宋鹏鹏, 高丽. 刚毛藻分解对荣成天鹅湖沉积物磷释放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(4): 826-831.
- 侯金枝, 魏权, 高丽, 等. 刚毛藻分解对上覆水磷含量及赋存形态的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(6): 2084-2090.
- 姜宏波, 田相利, 董双林, 等. 温度和光照强度对鼠尾藻生长和生化组成的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(1): 85-189.
- 况琪军, 马沛明, 刘国祥, 等. 大型丝状绿藻对 N、P 去除效果研究[J]. 水生生物学报, 2004, 28(3): 323-326.
- 雷国元. 大型丝状绿藻去除氮磷和抑制微藻的特性及其作用机制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009: 146-149.
- 梁霞, 李小平. 大型丝状绿藻去除城市水体污染物质的研究[J]. 环境科学, 2008, 29(1): 52-57.
- 刘冬梅, 姜霞, 金相灿, 等. 太湖藻类对水-沉积物界面磷交换过程的影响[J]. 环境科学研究, 2006, 19(4): 8-13.
- 宋关玲, 李伟, 丛超, 等. 水体磷含量对斜生栅藻生长影响的研究[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(35): 11576-11577.
- 宋康, 王国祥, 王文林, 等. 菹草生长对沉积物间隙水中各形态磷含量的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(2): 165-170.
- 宋鹏鹏, 侯金枝, 高丽, 等. 荣成天鹅湖沉积物磷的赋存形态和时空分布特征[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 98-102.
- 王友爱, 李平. 海岸生态环境变化对荣成市月湖旅游资源影响研究[J]. 海岸工程, 2009, 28(2): 98-104.
- 张强, 刘正文. 附着藻类对太湖沉积物磷释放的影响[J]. 湖泊科学, 2010, 22(6): 930-934.
- 周培疆, 郑振华, 余振坤, 等. 普通小球藻生长与武汉东湖水体磷形态的相关研究[J]. 水生生物学报, 2001, 25(6): 571-576.

Effects of macroalgal blooms on phosphorus concentrations in water and sediments of Rongcheng Swan Lake

WEI Quan, SHAO Xuelin, GAO Li*

Ocean School, Yantai University, Yantai 264005, China

Abstract: The fresh sediments and filamentous algae sampled from the dominated zone of *Chaetomorpha* spp. in Rongcheng Swan Lake were incubated in laboratory to study the changes of biomass and phosphorus (P) enrichment amount in algae, and total P (TP) and soluble reactive P (SRP) concentrations in water of different treatments. In addition, the influence of algal growth on P forms in sediments was analyzed. The results showed that *Chaetomorpha* grew faster at high P concentration in water, and relative growth rates (RGR) reached up to 14.88%. However, RGR decreased gradually as the P concentration in water declined. *Chaetomorpha* biomass varied considerably among different treatments. The biomass at the high P treatments were higher than those at low P treatments, and the great difference reached up to 26.50 g. During the growth period, TP and SRP concentrations in water declined remarkably, and TP concentrations at high P treatments declined from $0.93 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. At the low P treatments, SRP concentrations in water were lower than $0.006 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The sediments can release P for *Chaetomorpha* growth when water P level was low, and concentrations of redox-sensitive P (BD-P) and Fe/Al-bound P (Fe/Al-P) decreased by 23.98% and 12.61%, respectively. At the high P treatments, P enrichment amount in algae were relatively high. While at the same P level, P enrichment amount at the treatments with sediments was significantly higher than that without sediments. Correlation analysis suggested that algal biomass was well correlated with TP and SRP in water. At the high P treatments, TP and SRP concentrations had significantly negative correlation with algal biomass, but had significantly positive correlation with RGR. The results demonstrate that P nutrient in water and sediments can both promote the growth of *Chaetomorpha*. Furthermore, algal growth can reduce P concentration in water as well as accelerate P release from the sediments.

Key words: *Chaetomorpha*; macroalgal blooms; phosphorus concentrations; water; sediments