

刚毛藻分解对荣成天鹅湖沉积物磷释放的影响

侯金枝, 宋鹏鹏, 高 丽 *

(烟台大学海洋学院, 山东 烟台 264005)

摘 要:在荣成天鹅湖刚毛藻暴发和非暴发区域分别采集沉积物进行室内加藻模拟试验,定期监测上覆水的溶解氧(DO)、pH、化学需氧量(COD)和可溶性磷(SRP)等指标的变化,并分析了刚毛藻分解对沉积物磷释放的影响。结果表明,避光培养过程中,刚毛藻分解使上覆水体的 DO 含量大幅降低,形成厌氧环境($0\sim 0.14\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$);COD 含量则明显增加,各处理最大值变化在 $0.59\sim 6.93\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间。刚毛藻分解可明显促进沉积物中磷的释放,培养期间上覆水 SRP 的含量大幅上升,变幅为 $0.01\sim 1.51\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;暴发区沉积物+10 g 藻和沉积物+30 g 藻处理的最大释磷量分别为沉积物处理的 2.06 倍和 1.91 倍。不同湖区沉积物磷的释放能力存在较大差异,暴发区沉积物的释磷量明显高于非暴发区,沉积物释放是前者上覆水磷含量增加的主要来源,而在非暴发区藻类分解释放的磷高于沉积物中释放的磷。

关键词:刚毛藻;分解;沉积物;磷释放;荣成天鹅湖

中图分类号:X524 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)04-0826-06

Influence of Decomposition of *Cladophora* on Phosphorus Release from the Sediments of Rongcheng Swan Lake, China

HOU Jin-zhi, SONG Peng-peng, GAO Li*

(Ocean School, Yantai University, Yantai 264005, China)

Abstract: Rongcheng Swan Lake is a coastal lagoon in eastern Shandong Peninsula, China, whose water quality has deteriorated in recent years and large amounts of *Enteromorpha prolifera* occur in the spring and summer. In present study, the sediments were sampled in dominated zone and non-dominated zone of *Cladophora* in the lake, and cultivated with algae in the laboratory to reveal the influence of algal decomposition on P release from the sediments. Concentrations of dissolved oxygen(DO), chemical oxygen demand(COD), soluble reactive phosphorus(SRP) and pH in the overlying water were monitored during the experiment. Due to the decomposition of *Cladophora*, DO concentration in overlying water declined significantly and reached the anoxic condition($0\sim 0.14\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). However, COD concentrations of different treatments increased greatly, and the maximum varied from $0.59\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ to $6.93\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. During the algal decomposition, SRP concentrations in overlying water increased significantly, ranging from $0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ to $1.51\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. The maximum release amount of sediments with algae was much higher than that of sediments without algae. In dominated zone, P release amounts of sediments with algae treatments were almost twice of treatment without algae. P release ability from the sediments differed among different areas, which was significantly higher in the dominated zone than that in non-dominated zone. In dominated zone, the released P from sediments constituted the most part of P in overlying water; while in non-dominated zone, the released P from algal decomposition were higher than that from the sediments. In a word, the decomposition of *Cladophora* had an obvious effect on the P level of lake water.

Keywords: *Cladophora*; decomposition; sediments; phosphorus release; Rongcheng Swan Lake

荣成天鹅湖,又名月湖,位于山东半岛最东端荣成湾的西南侧。天鹅湖是一与外海相通的天然泻湖,湖水较浅,浮游生物较为丰富,春夏季大量生长大叶

草、马尾藻等水生植物。天鹅湖湿地为中国北方最大的天鹅越冬栖息地,但随着周边地区经济的快速发展以及人为活动的强烈干预,其生态环境遭到了一定破坏^[1-2]。近几年来,刚毛藻在湖中大量滋生繁殖,且发生的规模呈不断增长的趋势,这导致了水质恶化,并严重影响到其他水生生物的生存。

除外源营养盐的输入,湖泊沉积物的内源释放也可使水体维持在一定的营养水平,进而引起藻类的大

收稿日期:2011-09-09

基金项目:国家自然科学基金面上项目(40801084,31001113);山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(2007BS08017)

作者简介:侯金枝(1987—),女,山东烟台人,在读硕士生,主要从事湿地生源要素磷的循环研究。E-mail:houljzhi104@163.com

* 通讯作者:高 丽 E-mail:ligao117@126.com

量生长堆积^[3-4];反过来,藻类死亡堆积又可对水体的营养水平造成一定影响。藻类暴发对沉积物中营养盐释放的影响已引起普遍关注。藻类残体的分解不仅可以产生大量的氮磷营养盐,同时也会使水体的理化性质(如溶解氧、化学需氧量等)发生一定变化,进而影响到沉积物营养盐的释放,造成上覆水体磷含量的变化^[5-7]。藻类暴发对沉积物磷释放的影响目前多见于蓝藻等微藻的研究^[8-9]。为了解刚毛藻(大型绿藻)暴发对天鹅湖沉积物-水界面磷迁移行为的影响,本试验采用室内模拟的方法,初步探讨了其死亡分解对不同湖区沉积物磷释放的影响,这对于阐明藻类暴发条件下沉积物磷释放的机理以及内源污染的控制具有一定的参考价值。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2011年4月利用GPS全球定位系统在天鹅湖选取2个样点,采集表层沉积物样品(0~10 cm)。点1位于湖区西北部(37°21.447'N, 122°34.301'E),该区域为入湖河流的主要分布区,水质污染严重,刚毛藻频繁暴发;点2位于湖中心(37°20.820'N, 122°34.185'E),污染较轻,未见刚毛藻暴发。将沉积物样品立即运回实验室,去除砾石、动植物残体等,混匀后冷藏备用。在湖中采集新鲜刚毛藻,洗净、冷冻处理(48 h)后备用。新鲜湖水过滤后作为试验用上覆水,可溶性磷含量为 $0.002 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, pH和盐度分别为8.14和31.85。

1.2 试验设计

试验材料为表层新鲜沉积物(2个采样点)、过滤湖水和冷冻处理的刚毛藻,模拟试验容器为2.0 L的高型烧杯(高度23.5 cm、直径12.5 cm)。每个样点设5个处理,3次重复。试验处理分别为:(A)沉积物+10 g藻、(B)沉积物+30 g藻、(C)沉积物、(D)10 g藻、(E)30 g藻。

具体步骤:准确称取0.30 kg沉积物于高型烧杯中,使其均匀平铺于烧杯底部,再将不同重量的刚毛藻平铺在沉积物表面(无沉积物处理则只加入不同重量的藻),之后缓慢向烧杯中注入1.8 L过滤湖水;烧杯外覆黑纸以避光,放于暗处。培养过程中,定期在距水土界面3 cm处用移液管抽取水样(前2周为每日取样,之后为2 d 1次),分析上覆水中可溶性磷含量;每3 d测定1次上覆水的pH、DO和COD含量。每次取样后补充相同体积的试验湖水。试验过程中控制温度为20℃左右,周期为30 d。

1.3 分析方法

可溶性磷用钼锑抗分光光度法;COD用碱性高锰酸钾法^[10];DO用溶氧仪(SG6-FK2)测定;pH用pH计(FE20)测定。

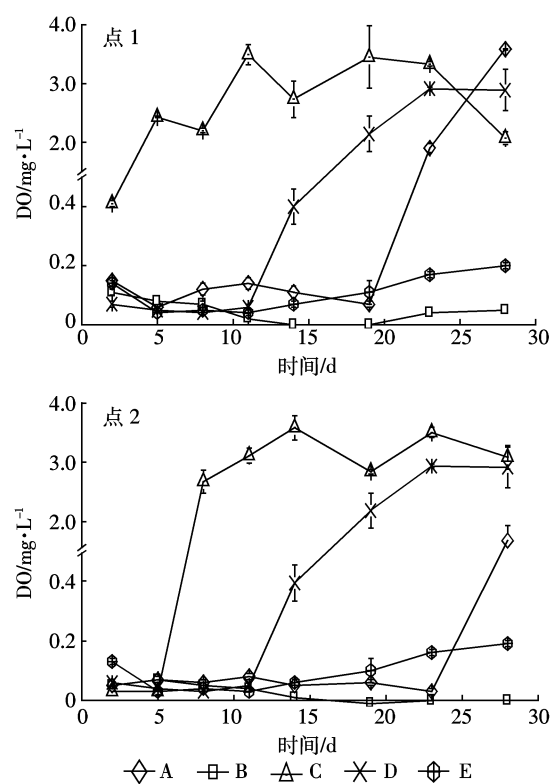
统计分析采用SPSS 13.0软件完成。

2 结果与分析

2.1 刚毛藻分解过程中上覆水 pH、COD 和 DO 的变化

2.1.1 上覆水 DO 的动态变化

刚毛藻分解使得上覆水的溶解氧(DO)含量明显降低(图1)。藻类暴发区(点1)各处理间的含量差异较大,顺序为:沉积物>10 g藻>沉积物+10 g藻>30 g藻>沉积物+30 g藻。沉积物处理在试验初期DO含量随时间延长而迅速增加,5 d后维持在好氧状态,含量变幅为 $2.20 \sim 3.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;沉积物+10 g藻和10 g藻处理在试验前期均为厌氧状态($\text{DO} < 0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),试验后期含量上升,形成好氧状态;沉积物+30 g藻和30 g藻处理在整个试验期间一直为厌氧状态。就点2而言,沉积物处理DO的含量最高($3.57 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),除沉积物+10 g藻处理在试验后期转为有氧状态外,其他处



A:沉积物+10 g藻 B:沉积物+30 g藻 C:沉积物 D:10 g藻 E:30 g藻

图1 刚毛藻分解过程中上覆水溶解氧的变化
Figure 1 Changes in DO in overlying water during the decomposition of *Cladophora*

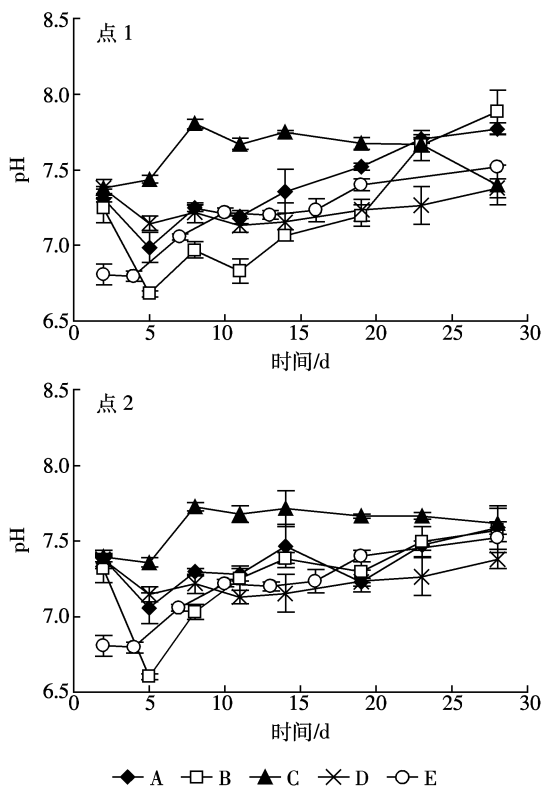
理的变化规律与点 1 相似。

2.1.2 上覆水 pH 的动态变化

由图 2 可见,与水体初始 pH 值(8.14)相比,2 样点各处理上覆水体的 pH 值均有所降低。点 1(藻类暴发区)各处理上覆水的 pH 变化在 6.80~7.88 之间,其中沉积物无藻处理在整个试验周期均高于加藻处理。沉积物处理 pH 的变幅为 7.38~7.80,在试验前期(0~10 d)随时间呈增加的趋势,之后趋于稳定;而加藻处理在试验前 5 d 较低,尤其是 30 g 藻处理,之后随着时间的延长而逐渐增加。对点 2(非暴发区)而言,各处理水体的 pH 动态变化与点 1 相似,沉积物处理最高,其余加藻处理则在后期较为接近。由此可见,除沉积物对上覆水体 pH 的缓冲作用外,刚毛藻分解也可使水体的 pH 有所降低。可能原因为刚毛藻分解使上覆水体 DO 明显下降,CO₂ 含量升高,从而造成了 pH 降低^[1]。

2.1.3 上覆水 COD 的动态变化

由图 3 可见,点 1 各处理上覆水的 COD 含量呈相似的动态变化:在试验前期随时间延长而逐渐增加,达到峰值后又有所降低。但各处理达到峰值所需

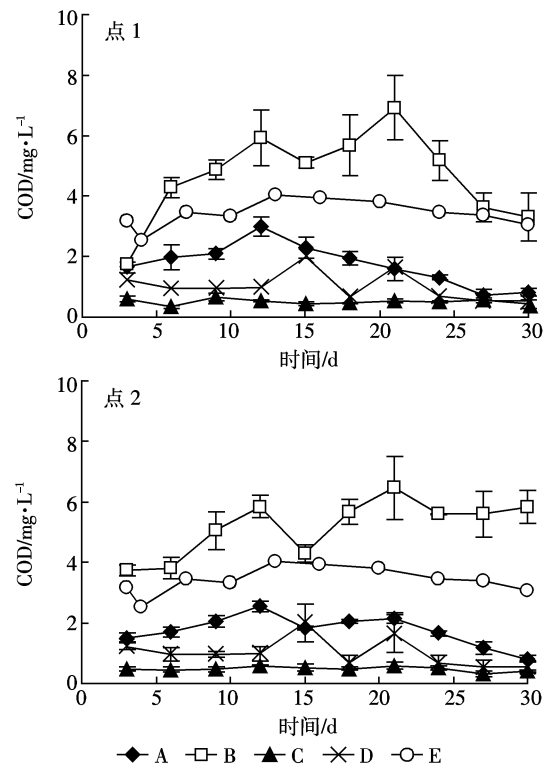


点 1
点 2
—◆— A —□— B —▲— C —×— D —○— E
A: 沉积物+10 g 藻 B: 沉积物+30 g 藻 C: 沉积物 D: 10 g 藻 E: 30 g 藻

图 2 刚毛藻分解过程中上覆水 pH 的变化

Figure 2 Changes in pH in overlying water during the decomposition of *Cladophora*

的时间不同,沉积物+30 g 藻的 COD 含量最高,在 21 d 达到峰值(6.93 mg·L⁻¹);而其余 4 处理的含量均低于 2.00 mg·L⁻¹,在 12 d 左右就达到了峰值。不同处理相比,COD 的含量顺序为:沉积物+30 g 藻>30 g 藻>沉积物+10 g 藻>10 g 藻>沉积物。点 2 各处理 COD 的变化趋势与点 1 相似,沉积物+30 g 藻处理最高,为 6.46 mg·L⁻¹。以上分析表明,刚毛藻分解能够明显增加上覆水的 COD 含量。



A: 沉积物+10 g 藻 B: 沉积物+30 g 藻 C: 沉积物 D: 10 g 藻 E: 30 g 藻

图 3 刚毛藻分解过程中上覆水 COD 的变化

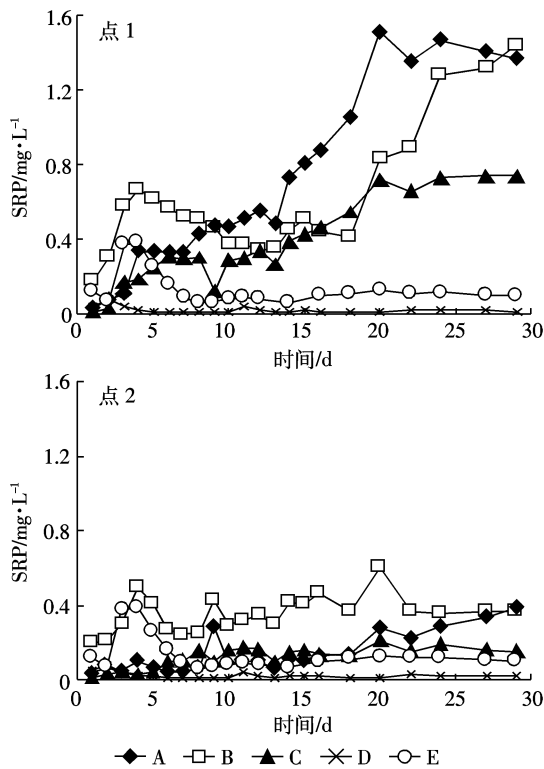
Figure 3 Changes in COD concentration in overlying water during the decomposition of *Cladophora*

2.2 刚毛藻分解对沉积物磷释放的影响

2.2.1 上覆水可溶性磷的含量变化

图 4 反映了加藻培养过程中上覆水可溶性磷含量(SRP)的动态变化。

在刚毛藻暴发区域(点 1),沉积物+10 g 藻与沉积物+30 g 藻处理的变化趋势类似,在试验前期 SRP 含量随时间延长而迅速增加,后期趋于稳定;而 10 g 藻和 30 g 藻处理只在试验初期含量有所增加,整个周期含量均低于 0.1 mg·L⁻¹。在试验前期水体 SRP 的含量顺序为沉积物+30 g 藻>沉积物+10 g 藻>沉积物>10 g 藻>30 g 藻;而后期(10~30 d)表现为沉积物+10 g 藻高于沉积物+30 g 藻处理,两处理的最大含量



A: 沉积物+10 g 藻 B: 沉积物+30 g 藻 C: 沉积物 D: 10 g 藻 E: 30 g 藻
图 4 刚毛藻分解过程中上覆水可溶性磷含量的变化
Figure 4 Changes in SRP concentration in overlying water during the decomposition of *Cladophora*

分别为 $1.51\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.44\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。
点 2 各处理上覆水的 SRP 含量明显低于点 1, 变幅为 $0.01\sim 0.61\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 沉积物+30 g 藻的最大含量为 $0.61\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 不到点 1 的 1/2。与点 1 不同的是, 点 2 的沉积物+30 g 藻在整个试验周期 SRP 含量都高于沉积物+10 g 藻处理, 各处理含量顺序为: 沉积物+30 g 藻>沉积物+10 g 藻>30 g 藻>沉积物>10 g 藻。

2.2.2 不同处理沉积物磷的释放速率

表 1 数据表明, 不同处理间磷的释放速率存在明显差异。就点 1 而言, 各处理释放速率的变幅为 $3.71\sim$

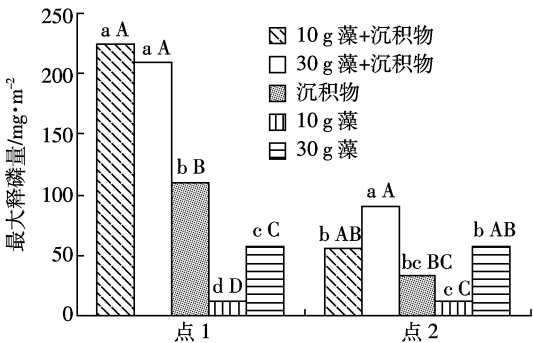
$18.09\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 表现为沉积物+30 g 藻>沉积物+10 g 藻>沉积物>30 g 藻>10 g 藻。总的变化趋势为: 在试验初期磷释放量较高, 释放速率也较大, 之后随着时间的延长而有所降低。沉积物+10 g 藻处理水体磷含量持续增加, 在 20 d 左右释放速率达到峰值, 而其他处理在 5~10 d 就达到了峰值。点 2 各处理的释放速率明显低于点 1, 由高到低依次为: 沉积物+30 g 藻>30 g 藻>沉积物+10 g 藻>沉积物>10 g 藻。

2.2.3 不同处理最大释磷量的比较

对各处理下的最大释磷量进行方差分析, 结果如图 5 所示。

点 1 各处理的最大释放量变化在 $11.90\sim 224.53\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间, 表现为沉积物+10 g 藻>沉积物+30 g 藻>沉积物>30 g 藻>10 g 藻。Duncan's 多重比较表明, 沉积物+10 g 藻与沉积物+30 g 藻处理间差异不显著, 但两者与其他 3 个处理间的差异均达到了极显著水平 ($P<0.01$)。由此可见, 暴发区沉积物释放的磷是上覆水体磷含量增加的主要来源。

点 2 各处理的最大释磷量远低于点 1, 变化在 $11.90\sim 90.08\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间, 大小顺序为沉积物+30 g



不同大、小写字母分别表示同一样点不同处理间达 $P<0.01$ 和 $P<0.05$ 水平差异显著

图 5 不同处理最大释磷量的比较

Figure 5 Comparison of the maximum release amount of phosphorus among different treatments

表 1 刚毛藻分解对磷释放速率的影响($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)

Table 1 The influence of decomposition of *Cladophora* on the release rate of phosphorus($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)

采样点	处理	0~5 d	0~10 d	0~15 d	0~20 d	0~25 d	0~30 d
点 1	沉积物+10 g 藻	9.78±1.38	6.84±1.43	7.86±0.25	10.97±0.29	8.88±0.55	6.86±1.05
	沉积物+30 g 藻	18.09±1.56	5.42±0.75	4.95±0.44	6.03±0.26	7.73±0.67	7.21±0.34
	沉积物	7.33±0.56	4.20±0.35	4.14±0.05	5.24±0.06	4.42±0.31	3.71±0.27
点 2	沉积物+10 g 藻	1.99±0.07	1.30±0.29	1.03±0.27	2.04±0.22	1.75±0.36	1.94±0.22
	沉积物+30 g 藻	11.85±6.92	4.23±2.22	3.95±1.50	4.41±1.62	2.16±0.96	1.83±0.71
	沉积物	1.25±0.44	2.31±0.40	1.52±0.33	1.53±0.14	1.16±0.26	0.76±0.13
	10 g 藻	0.48±0.44	0.16±0.12	0.19±0.14	0.08±0.08	0.14±0.06	0.09±0.06
	30 g 藻	7.58±2.10	1.15±0.06	0.67±0.42	0.93±0.19	0.77±0.08	0.46±0.13

藻>30 g 藻>沉积物+10 g 藻>沉积物>10 g 藻。沉积物+30 g 藻与其他 4 个处理间的差异均达到了显著水平($P<0.05$),其中与沉积物、10 g 藻处理间达到了极显著水平($P<0.01$)。沉积物+10 g 藻、沉积物、30 g 藻这 3 个处理间差异不显著,但均极显著高于 10 g 藻处理。

3 讨论

藻类暴发条件下,上覆水中可溶性磷浓度的增加主要有以下两个来源:①沉积物释放:沉积物是湖泊中营养盐的重要归宿和蓄积库,其富集的磷可在一定环境条件下向上覆水体释放;②藻分解释放:藻类本身含有一定量的营养盐,在其死亡分解过程中这些营养元素向上覆水体释放,造成上覆水体磷浓度升高^[4,7]。研究表明,藻类存在可促进沉积物中磷的释放^[8,12]。本试验中沉积物加藻处理磷的释放量远高于未加藻处理,说明刚毛藻分解明显促进了天鹅湖沉积物中磷的释放。

藻类分解对上覆水体磷浓度的贡献可分为两个方面:一是本身降解过程中向水体释放磷,即直接磷源;二是通过改变水土界面的环境条件而促进沉积物中磷的释放,从而造成上覆水磷含量的变化,即间接影响。本研究中刚毛藻分解前总磷含量为 $2.06 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,分解后(试验结束时)为 $1.34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,含量减少了 34.78%,可见刚毛藻分解为上覆水提供了部分磷源。藻类残体的分解可使水体的理化性质发生一定变化,进而影响到沉积物营养盐的释放^[5-7]。培养过程中,加藻处理水体的 DO 明显低于无藻处理,且随加藻量的增加,DO 下降明显,并形成厌氧状态(图 1),说明刚毛藻分解可使上覆水的 DO 含量急剧降低,从而使得三价铁络合物发生还原,与之结合的磷随之释放^[13-14]。朱梦圆等^[9]在研究蓝藻衰亡对太湖沉积物磷释放影响中发现,DO 浓度的降低是导致上覆水营养盐浓度增加的主要原因,本研究结果与之一致。

本研究中,刚毛藻分解对暴发区和非暴发区沉积物磷释放的影响也存在区别。暴发区(点 1)各处理释放量的顺序为沉积物+10 g 藻>沉积物+30 g 藻>沉积物>30 g 藻>10 g 藻,沉积物与 10 g 藻两个处理的释放量之和仅为沉积物+10 g 藻处理的 53.96%,而沉积物与 30 g 藻两个处理之和为沉积物+30 g 藻处理的 79.39%,说明藻类分解明显促进了沉积物中磷的释放,其中对水体磷水平的间接影响要高于直接影响。就点 2 而言,最大释放量由高到低为沉积物+30 g 藻>30 g 藻>沉积物+10 g 藻>沉积物>10 g 藻,其中沉积物

和 30 g 藻处理的释放量分别为沉积物+30 g 藻处理的 36.23%和 63.07%,可见刚毛藻自身分解释放的磷对上覆水磷浓度贡献较大。有关刚毛藻分解对上覆水磷浓度变化的直接和间接贡献率有待于进一步研究。

天鹅湖不同区域沉积物磷的释放能力存在很大差异,其中藻类暴发区沉积物的最大释磷量为非暴发区的 3.35 倍,这可能与不同区域沉积物的理化性质、磷赋存形态等差异有关^[3,13]。点 1 位于湖区西北部,是入湖河流的主要分布区,沉积物粘粒、粉粒和绿泥石含量较高,外源污染的输入导致该区域营养盐含量丰富,沉积物中铁铝结合态磷(Fe/Al-P)含量较高^[15-16];而点 2 位于湖中心,远离岸边污染源,沉积物中砂粒和活性铁含量相对较高,磷以较稳定的钙磷(Ca-P)为主(表 2、表 3)。研究表明,Ca-P 对低 pH 条件比较敏感,在弱碱性的水环境中活性很低;而 Fe/Al-P 通常被认为是活性较强的磷形态,其既受 pH 影响又易受 Eh 影响,在碱性条件下 OH⁻可与无定形铁铝胶合体中的 PO₄³⁻发生交换,促进了磷酸盐的解析而易于向上覆水体释放^[17-18]。本释放试验中,上覆水体的 pH 一直维持在弱碱性状态,较有利于 Fe/Al-P 的释放。以上因素综合导致了点 1 沉积物磷的释放能力高于点 2。

天鹅湖西北部为刚毛藻频繁暴发区,沉积物中活性较强的铁铝磷含量较高,在目前湖水为弱碱性的条件下(pH 为 8.0~8.5),该区域沉积物具有较大的释磷潜力^[15-16]。综上所述,刚毛藻的死亡分解能够促进沉积物磷的释放,提高水体磷的水平;另一方面,水体磷浓度的升高又可导致藻类的过度繁殖,进而造成更严重的污染。因此,对湖区西北部内源污染的治理迫在眉睫。

表 2 表层沉积物的粒度及矿物组成

Table 2 Grain size and mineral composition of the surface sediments

采样点	粒度/%			矿物组成/%						
	粘粒	粉粒	砂粒	绿泥石	水云母	高岭石	闪石	石英	长石	
点 1	45.30	37.29	17.40	15.32	32.16	8.36	3.72	34.62	6.20	
点 2	37.37	34.95	27.67	6.00	31.20	9.00	7.70	37.00	9.10	

表 3 表层沉积物的基本理化性质

Table 3 The basic physicochemical properties of the surface sediments

采样点	总磷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	铁铝结合态 磷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	钙磷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	有机磷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	活性铁/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	活性铝/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	pH
点 1	456.29	120.87	204.34	80.78	4203.88	962.59	5.78
点 2	485.07	76.23	280.44	98.39	5995.87	535.31	6.97

4 结论

(1)刚毛藻死亡分解可使水体的理化性质发生一定变化。在藻类分解过程中,上覆水体 pH 略有降低,但始终处于弱碱性状态;COD 含量明显增加,且随刚毛藻量的增加而增幅变大;刚毛藻分解消耗氧气,使得加藻处理上覆水的 DO 急剧降低,达到厌氧状态($DO < 0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。

(2)刚毛藻死亡分解形成极度的缺氧环境,从而使得沉积物磷的释放量增加,上覆水中 SRP 浓度大幅上升。藻类存在对沉积物磷的释放有明显促进作用,但对不同湖区沉积物具有不同影响。刚毛藻暴发区沉积物磷的释放量远高于非暴发区,在暴发区藻类分解通过改变环境条件,促进了沉积物中磷的释放,从而提高了水体中磷的含量;而在非暴发区刚毛藻自身分解释放的磷则高于沉积物的释放。

(3)天鹅湖西北部为刚毛藻频繁暴发区,且该区域沉积物具有较大的释磷潜力,两者相互促进,形成一个恶性循环。因此,对湖区西北部内源污染的治理迫在眉睫。

参考文献:

- [1] 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.
WANG You-ai, LI Ping. Research of the influence of environment changes of coastal ecosystems on tourism resources of Rongcheng Moon Lake[J]. *Coastal Engineering*, 2009, 28(2): 98-104.
- [2] 薛允传,贾建军,高抒. 山东月湖的沉积物分布特征及搬运趋势[J]. 地理研究, 2002, 21(6): 705-714.
XUE Yun-chuan, JIA Jian-jun, GAO Shu. Sediment distribution and transport patterns in the Lagoon Yuehu at the eastern tip of Shandong Peninsula, China[J]. *Geographical Research*, 2002, 21(6): 705-714.
- [3] Søndergaard M, Jensen J P, Jeppesen E. Internal phosphorus loading in shallow Danish lakes[J]. *Hydrobiologia*, 1999, 408/409: 145-152.
- [4] Xie L, Xie P, Tang H J. Enhancement of dissolved phosphorus release from sediment to lake water by *Microcystis* blooms—an enclosure experiment in a hyper-eutrophic, subtropical Chinese lake[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 122(3): 391-399.
- [5] 刘国峰,申秋实,张雷,等. 藻源性黑水团环境效应: 对水-沉积物界面氮磷变化的驱动作用[J]. 环境科学, 2010, 32(12): 2917-2924.
LIU Guo-feng, SHEN Qiu-shi, ZHANG Lei, et al. Environment effects of algae-caused black spots: Driving effects on the N, P changes in the water-sediment interface[J]. *Environmental Science*, 2010, 32(12): 2917-2924.
- [6] 刘冬梅,姜霞,金相灿,等. 太湖藻对水-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.
LIU Dong-mei, JIANG Xia, JIN Xiang-can, et al. Effects of algae on the phosphorus exchange at water-sediment interface in Taihu Lake[J]. *Research of Environmental Science*, 2006, 19(4): 8-13.
- [7] Paalme T, Kuk H, Kotta J, et al. 'In vitro' and 'in situ' decomposition of nuisance macroalgae *Cladophora glomerata* and *Pilayella littoralis*[J]. *Hydrobiologia*, 2002, 475/476: 469-476.
- [8] 孙小静,秦伯强,朱广伟. 蓝藻死亡分解过程中胶体态磷、氮、有机碳的释放[J]. 中国环境科学, 2007, 27(3): 341-345.
SUN Xiao-jing, QIN Bo-qiang, ZHU Guang-wei. Release of colloidal phosphorus, nitrogen and organic carbon in the course of dying and decomposing of *Cyanobacteria*[J]. *China Environmental Science*, 2007, 27(3): 341-345.
- [9] 朱梦圆,朱广伟,王永平. 太湖蓝藻水华衰亡对沉积物氮、磷释放的影响[J]. 环境科学, 2011, 32(2): 409-415.
ZHU Meng-yuan, ZHU Guang-wei, WANG Yong-ping. Influence of scum of algal bloom on the release of N and P from sediments of Lake Taihu[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(2): 409-415.
- [10] 魏复盛. 水和废水监测分析方法[M]. 第四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 246-248.
WEI Fu-sheng. The analysis and monitoring method of water and wastewater[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 246-248.
- [11] 吴剑,孔倩,杨柳燕,等. 铜绿微囊藻生长对培养液 pH 值和氮转化的影响[J]. 湖泊科学, 2009, 21(1): 123-127.
WU Jian, KONG Qian, YANG Liu-yan, et al. Effect of the growth of *Microcystis aeruginosa* on the pH value and the nitrogen transformation in the medium[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, 21(1): 123-127.
- [12] 王晓蓉,华兆哲,徐菱,等. 环境条件变化对太湖沉积物磷释放的影响[J]. 环境化学, 1996, 15(1): 15-19.
WANG Xiao-rong, HUA Yao-zhe, XU Ling, et al. Effect of changes of environmental conditions on the P release from sediments in Taihu Lake[J]. *Environmental Chemistry*, 1996, 15(1): 15-19.
- [13] 蔡景波,丁学锋,彭红云,等. 环境因子及沉水植物对底沉积物磷释放的影响研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(2): 151-154.
CAI Jing-bo, DING Xue-feng, PENG Hong-yun, et al. Impact of environmental factors and submerged plant on phosphate release from sediment[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(2): 151-154.
- [14] 张智,刘亚丽,段秀举. 湖泊底沉积物释磷模型及其影响因素试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1): 45-50.
ZHANG Zhi, LIU Ya-li, DUAN Xiu-ju. Model and research of phosphorus releasing from sediment of lakes[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2007, 26(1): 45-50.
- [15] 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[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 98-102.
SONG Peng-peng, HOU Jin-zhi, GAO Li, et al. Phosphorus fractions and temporal-spatial distribution characteristics in sediments from Rongcheng Swan Lake[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(3): 98-102.
- [16] 高丽,宋鹏鹏,史衍玺,等. 天鹅湖沉积物中营养盐和重金属的分布特征[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 99-102.
GAO Li, SONG Peng-peng, SHI Yan-xi, et al. Distribution characteristics of nutrients and heavy metal in sediments from Swan Lake[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(4): 99-102.
- [17] 金相灿,王圣瑞,庞燕. 太湖沉积物磷形态及 pH 值对磷释放的影响[J]. 中国环境科学, 2004, 24(6): 707-711.
JIN Xiang-can, WANG Sheng-rui, PANG Yan. The influence of phosphorus forms and pH on release of phosphorus from sediments in Taihu Lake[J]. *China Environmental Science*, 2004, 24(6): 707-711.
- [18] 袁和忠,沈吉,刘恩峰,等. 模拟水体 pH 控制条件下太湖梅梁湾沉积物中磷的释放特征[J]. 湖泊科学, 2009, 21(5): 663-668.
YUAN He-zhong, SHEN Ji, LIU En-feng, et al. Characteristic of phosphorus release with the control of pH of sediments from Meiliang Bay, Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Science*, 2009, 21(5): 663-668.