

# 莱茵衣藻增殖 沉降与死亡过程对太湖底泥氮素释放的影响

赵 森<sup>1</sup>, 韩建刚<sup>1</sup>, 黄卫红<sup>1</sup>, 闫永胜<sup>2</sup>, 田 艳<sup>1</sup>

(1. 江苏大学环境学院, 江苏 镇江 212013; 2. 江苏大学化学化工学院, 江苏 镇江 212013)

**摘 要:**以太湖梅梁湾为研究原型区域,采集水样和泥样,通过室内模拟实验,添加莱茵衣藻(*Chlamydomonas Reinhardtii*)于水-泥体系中,研究了莱茵衣藻增殖、沉降与死亡过程对底泥氮素释放的影响。结果表明,莱茵衣藻在大量增殖过程中伴随着藻体沉降,沉降过程中大部分藻体死亡,小部分藻体聚集在底泥表面,当养分增加时其再次增殖并悬浮;藻体增殖、沉降与死亡过程促进了底泥 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 的释放;上覆水 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 累积消耗量与底泥脲酶活性呈显著正相关关系。

**关键词:**莱茵衣藻;底泥;氮素;脲酶

中图分类号:X524 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2010)11-2198-05

## Effects of *Chlamydomonas Reinhardtii* Proliferating, Blooming and Decaying on Nitrogen Release from Sediment of Lake Taihu, China

ZHAO Miao<sup>1</sup>, HAN Jian-gang<sup>1</sup>, HUANG Wei-hong<sup>1</sup>, YAN Yong-sheng<sup>2</sup>, TIAN Yan<sup>1</sup>

(1. School of The Environment, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. School of Chemistry & Chemical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** Nutrient releases from sediment in shallow freshwater lakes are partly responsible for eutrophication. Previous studies focused mainly on the release of internal phosphorus, but few of them attempted to define the effects of nitrogen. In the meantime, effects of nutrient release on algae blooming have been widely reported, however, there has been no detailed data available concerning the effects of algae behavior on nutrient releases. Water and sediment samples from Meiliang Bay in Lake Taihu, Eastern China, were employed to investigate the effects of *Chlamydomonas Reinhardtii* proliferating, blooming and decaying on nitrogen release from sediment under incubation conditions. Algae sedimentation was found during their proliferating and suspending. Most of algae died and decayed during the sedimentation, and minority of them survived on the surface of sediment. Their re-suspending was observed with nutrient increase. In addition, the release of  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  from sediment was enhanced during the algae proliferating, blooming and decaying. A significant positive correlation between the urease activities of sediment and the accumulated consumption of  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  in water was found.

**Keywords:** *Chlamydomonas Reinhardtii*; sediment; nitrogen; urease

我国湖泊河流众多,且受到不同程度的污染。太湖作为重点治理的富营养化浅水湖泊之一,外污染源目前得到了一定程度的控制,但其近年来水华现象的

频繁暴发使人们再次重点关注其内源污染现状与机制<sup>[1-2]</sup>。

研究表明,温度、光照、溶解氧、pH、扰动、大型沉水植物与微生物等环境因子对底泥营养盐释放存在重要影响<sup>[3-6]</sup>。然而,这些研究中的大部分重点关注磷营养盐的释放与转化,对氮素的关注较为少见。既然底泥营养盐的释放对藻体的增殖、悬浮等产生重要影响,那么藻体的这些行为应当也对底泥营养盐的释放

收稿日期:2010-05-17

基金项目:国家自然科学基金(40901112,40905070);国家博士后基金(20070420970);江苏省博士后基金(0702010B)

作者简介:赵 森(1984—),男,河南信阳人,硕士研究生,主要从事水环境污染治理研究。E-mail:zhaomiao840529@yahoo.com.cn

通讯作者:韩建刚 E-mail:hanjiangang@ujs.edu.cn

等产生影响。孙小静等<sup>[7]</sup>指出,蓝藻死亡分解过程中伴随着胶体态和颗粒态磷、氮和有机氮的释放。胶体态和颗粒态有机氮在自身的重力和底泥吸附作用下会为底泥提供丰富的有机氮源,底泥中的脲酶(Urease)可使有机氮逐步转化成铵态氮<sup>[8-9]</sup>,这对底泥内源释放产生的影响和机理值得研究。

本文以太湖梅梁湾为研究原型区域,采集水样和泥样,通过室内模拟方法,初步探讨了富营养化中常见藻类-莱茵衣藻(*Chlamydomonas Reinhardtii*)增殖、沉降与死亡过程对底泥氮营养盐释放的影响及机制,以期为湖泊内源污染控制与水华暴发防治提供科学依据与新思路。

## 1 材料与方法

### 1.1 区域概况

梅梁湾位于太湖最北部,南北长14 km,东西长约8 km,北接无锡市,南面与太湖相通,是无锡市的主要水源地,也是近年来太湖富营养化较为严重的湖区<sup>[10]</sup>。

### 1.2 样品采集

水样和泥样均取自中科院太湖湖泊生态系统研究站在太湖梅梁湾所设采样点。用2.5 L的有机玻璃采水器采集表层0.5 m处水样,采集的水样混合后,置于室内避光保存,水样中硝态氮( $\text{NO}_3^--\text{N}$ )、亚硝态氮( $\text{NO}_2^--\text{N}$ )和铵态氮( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )含量分别为2.225、0.142、0.079  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。用彼得森采泥器采集表层底泥,底泥按四分法混合并风干处理后,过筛常温保存,硝态氮( $\text{NO}_3^--\text{N}$ )、亚硝态氮( $\text{NO}_2^--\text{N}$ )和铵态氮( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )含量分别为1.065、0.485、34.180  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

### 1.3 藻种

莱茵衣藻(*Chlamydomonas Reinhardtii*)购于中国科学院武汉水生生物研究所淡水培养室;莱茵衣藻属单细胞藻类,隶属绿藻门衣藻属,富含叶绿素a和叶绿素b,常见于各类水体中。

### 1.4 培养方法

取若干个100 mL锥形瓶,分别均加入30 g泥样、65 mL水样和15 mL莱茵衣藻藻液(泥样与水样均进行灭菌处理,整个实验过程进行无菌操作),置于25℃恒温光照培养箱中培养,光强为2500 lx,光照与黑暗比为12 h:12 h,同步做无藻对照实验。重复3次。每隔72 h取水样和泥样,测定上覆水与底泥中的叶绿素a(Chl a)、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 、 $\text{NO}_2^--\text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 含量,分析底泥脲酶(Urease)活性。

上覆水和底泥中Chl a按Arnon法测定<sup>[11-12]</sup>, $\text{NO}_3^--\text{N}$ 、

$\text{NO}_2^--\text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 含量用连续流动注射分析仪测定;Urease活性测定参照文献[8-9]。

## 2 结果与分析

### 2.1 莱茵衣藻增殖、沉降过程 Chl a 含量动态变化

由图1可见,上覆水和底泥中Chl a的含量在培养期为3~12 d时均迅速增加,培养期为12~27 d时,上覆水中Chl a表现为显著下降的变化特征(5.4~1.6  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ );而底泥中Chl a的含量在12~21 d时呈现为相对缓慢增加的变化(3.5~4.2  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),21~27 d时迅速增加,上升至5.8  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。随着培养时间的延长,上覆水中Chl a的含量略有升高(27~32 d),此后迅速下降(32~37 d);底泥中Chl a的含量则先迅速下降(27~32 d),而后持续升高(32~37 d)。

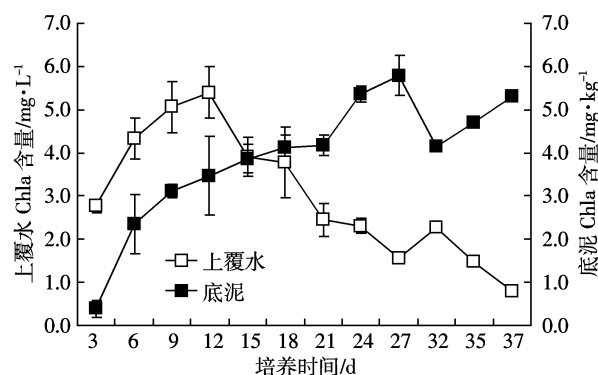


图1 莱茵衣藻培养过程中上覆水与底泥 Chl a 含量动态变化  
Figure 1 Changes in Chlorophyll a concentrations in water and sediment during the incubation of *Chlamydomonas Reinhardtii*

对衣藻增殖与沉降过程中Chl a在上覆水与底泥两相中的质量分布的分析可见(图2),培养至12 d时,

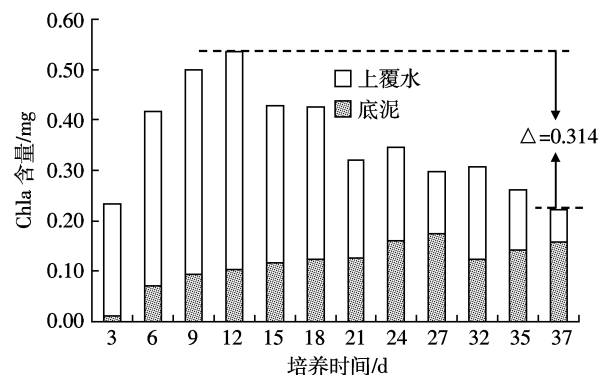


图2 莱茵衣藻培养过程中 Chl a 总量变化  
Figure 2 The mass distributions of Chlorophyll a in the phases of water and sediment during the incubation of *Chlamydomonas Reinhardtii*

Chl a 总量达到最高(0.536 mg)。随着培养时间的延长(12~27 d),底泥中的总量达到最高值(0.174 mg),上覆水中 Chl a 总量减少量达 0.307 mg,底泥中的增加量仅有 0.070 mg。27~32 d 时,底泥中 Chl a 总量减少了 0.039 mg,而上覆水中却增加了 0.057 mg。32~37 d 时,上覆水中 Chl a 总量减少了 0.119 mg,同期底泥中的 Chl a 总量增加了 0.024 mg。

## 2.2 莱茵衣藻增殖、沉降与死亡过程上覆水与底泥氮素含量动态变化

### 2.2.1 上覆水 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N 动态变化

由图 3 可见,无藻对照处理上覆水中  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度比较稳定,变化在  $7.427\sim 7.989\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,而有藻处理  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度明显较低,并且,其从第 3 d 开始就降至  $0.905\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,此后迅速下降接近零。

无藻对照处理上覆水中  $\text{NH}_4^+$ -N 的浓度在 3~12 d 时从  $4.110\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  迅速降至  $2.491\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,此后(12~32 d),其保持相对较小的波动趋势,浓度变化在  $2.195\sim 2.680\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 4)。相比较而言,有藻处理  $\text{NH}_4^+$ -N 浓

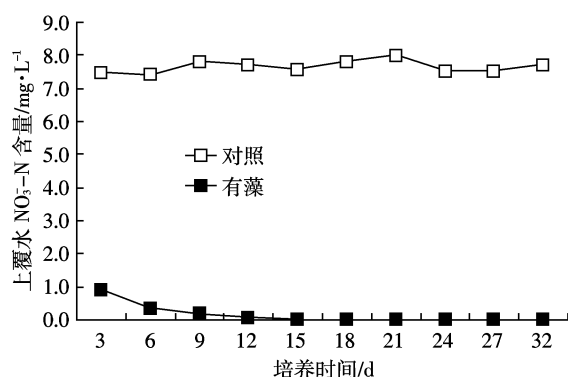


图 3 衣藻增殖、沉降与死亡过程上覆水中  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度变化  
Figure 3 Changes in  $\text{NO}_3^-$ -N concentration in water during the incubation of *Chlamydomonas Reinhardtii*

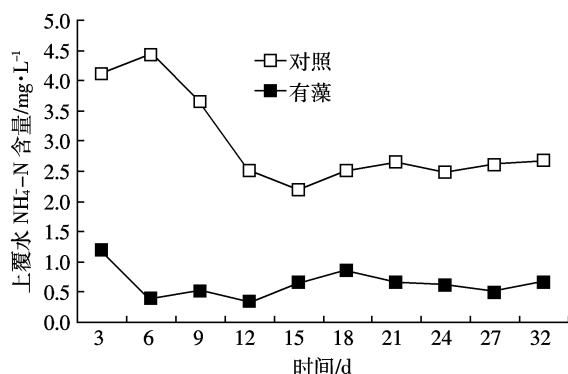


图 4 衣藻增殖、沉降与死亡过程上覆水中  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度变化  
Figure 4 Changes in  $\text{NH}_4^+$ -N concentration in water during the incubation of *Chlamydomonas Reinhardtii*

度的降低十分明显。前 6 d 内  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度迅速降至  $0.416\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,12 d 时为  $0.330\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。然而,12~18 d 时, $\text{NH}_4^+$ -N 浓度从  $0.330\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  增至  $0.850\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。此后(18~27 d), $\text{NH}_4^+$ -N 浓度保持微小的下降趋势。

### 2.2.2 底泥 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N 动态变化

由图 5 可见,无藻对照处理底泥  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度含量在 3~32 d 期间变化缓慢( $3.554\sim 4.108\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )。有藻处理底泥  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度在前 6 d 即迅速降低,15 d 时已经降至  $0.048\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。此后,底泥中  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度保持在极低水平。

图 6 显示,无藻对照和有藻底泥  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度均表现为一定程度的波动变化。但较为明确的是,有藻处理的  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度明显地低于无藻对照处理的。在 3~12 d 时,无藻对照与有藻底泥  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度处于下降趋势;12~15 d 时,无藻与有藻处理底泥中  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度处于增加趋势。此后 15~32 d,无藻对照底泥  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度处于微小波动,有藻处理  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度先处于下降趋势(15~27 d),而后处于增加趋势(27~32 d)。

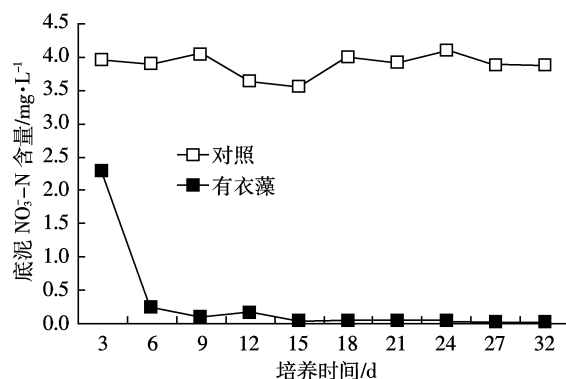


图 5 衣藻增殖、沉降与死亡过程底泥中  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度变化  
Figure 5 Changes in  $\text{NO}_3^-$ -N concentration in sediment during the incubation of *Chlamydomonas Reinhardtii*

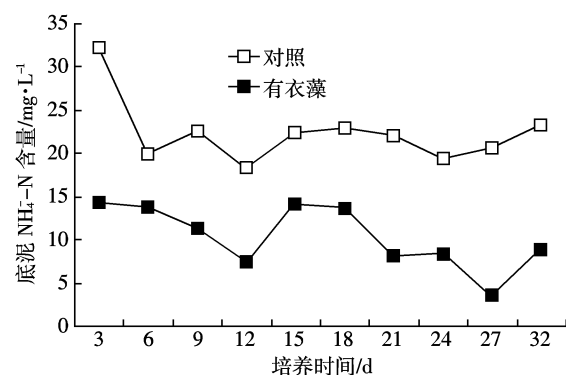


图 6 衣藻增殖、沉降与死亡过程底泥中  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度变化  
Figure 6 Changes in  $\text{NH}_4^+$ -N concentration in sediment during the incubation of *Chlamydomonas Reinhardtii*

### 2.3 莱茵衣藻增殖、沉降和死亡过程底泥中脲酶活性变化

由图7可见,有藻处理底泥脲酶活性显著高于无藻对照处理的,尤其是在藻体增殖阶段(3~12 d)。并且,有藻处理底泥脲酶活性与上覆水  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  累积消耗量之间呈现显著的正相关关系(图8)。

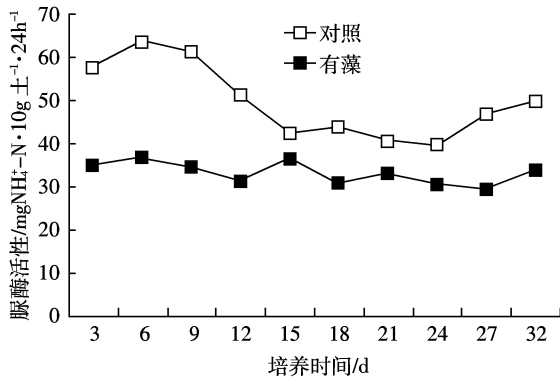


图7 底泥脲酶活性变化

Figure 7 Changes in urease activity of sediment

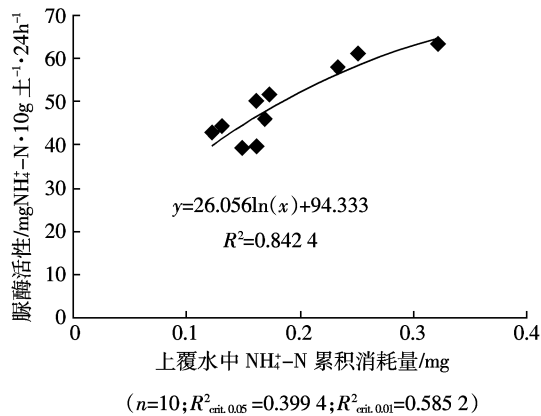


图8 底泥脲酶活性与上覆水  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  累积消耗量之间的关系

Figure 8 Relationship between urease activity of sediment and the accumulated consumption of  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  in water

## 3 讨论

莱茵衣藻3~12 d时上覆水中生物量(Chl a)增加,表明其处于大量增殖阶段(图1);与此同时,底泥中衣藻生物量的增加表明部分藻体已经开始沉降。12~27 d时,上覆水中衣藻的减少量明显超过底泥中的增加量(图2),表明上覆水中藻体的沉降并不意味着其会完全到达底泥表面,大部分藻体在沉降过程中不断死亡分解。值得注意的是,27~32 d时,底泥中莱茵衣藻减少量却多于上覆水中的增加量,这可能是沉降到底泥表面后的部分藻体再次增殖并少量悬浮。原因可能是前期藻体的死亡分解缓解了养分的胁迫程度;而

沉降到底泥表面后,可供藻体增殖的养分可利用性显著增加。32~37 d时,上覆水中生物量的减少意味着藻体的再次沉降,虽然同期底泥中的生物量增加,但0.024 mg的增量与0.119 mg的减少量再次表明,在缺乏外源营养盐补充的前提下,藻体的每次沉降过程均伴随着数量可观的个体的死亡与分解。整个培养过程中,累积约0.314 mg的生物量消失,占到最高量(12 d时)的58.6%。

无藻对照处理上覆水中  $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度明显要高于有藻处理(图3),并且从第3 d开始,有藻处理中  $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度就已经很低,并持续降低接近零值,说明莱茵衣藻的存在使  $\text{NO}_3^--\text{N}$  大量被消耗。消耗的原因可能存在于两个方面:其一,  $\text{NO}_3^--\text{N}$  被藻体吸收利用;其二,衣藻对水-泥体系微环境的改变可能使部分  $\text{NO}_3^--\text{N}$  被还原。图4中无藻对照处理3~12 d时上覆水  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度迅速降低的原因可能与底泥对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的吸附有关。当上覆水加入到底泥中后,所含的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  逐渐与底泥颗粒发生吸附-解吸过程,该过程相对平衡之后,体系中的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  保持一个相对稳定的浓度(12~32 d)。相比较而言,有藻处理  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度的变化至少存在四方面的原因:其一,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度在前12 d的迅速降低与藻体在同期的迅速增殖相一致,这表明,衣藻在增殖过程中吸收或转化了部分  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ;其二,水体与底泥相中的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  也存在动态的吸附-解吸平衡,改变了  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的分布;其三,图1、2已经表明了部分衣藻的死亡分解现象,这也将贡献于水-泥体系  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的浓度变化;最后,培养过程中,底泥的矿化也会释放部分  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 。结合图1、图2,上覆水中衣藻生物量在12~21 d时迅速下降,而底泥中在此期间处于相对缓慢增加过程,这表明大部分藻体在此过程中死亡分解。显然,此时上覆水中的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度应当有所变化。对有藻处理  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度变化的观测结果恰恰表明  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度在此期间的增加。由此可见,尽管有藻处理上覆水中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的浓度变化受多种因素的影响,在这期间,藻体行为主导着上覆水中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的浓度变化。21~27 d,有藻处理上覆水中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度呈现微小下降特征,而藻体在底泥表面继续沉降。尽管在此期间藻体仍然在不断死亡分解,但显然其对水体  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度的贡献已经显著降低。

有藻处理底泥  $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度显著地低于无藻对照处理(图5),且在前6 d即迅速降低,随后处于极低浓度水平,其原因是藻体对  $\text{NO}_3^--\text{N}$  的吸收利用所致。图

6 中,无藻对照处理底泥中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度总体上表现为一定程度的波动变化(尤其在 3~12 d),其原因可能是底泥的吸附-解吸相对平衡过程的影响。而值得注意的是,除了明显的低于无藻对照处理外,有藻处理底泥中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度也处于波动变化且与上覆水中变化趋势相似(结合图 4),这表明除了受底泥的吸附-解吸相对平衡过程的影响外,当上覆水中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  因藻体的吸收或分解而减少时,底泥中的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  得到了促进释放。

图 7 中有藻处理底泥脲酶活性在大量增殖过程中显著的高于无藻对照处理,说明藻体增殖过程中对水-泥体系  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的大量吸收利用,迅速降低了体系中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的浓度,这使得由脲酶控制的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的释放过程被加速,而这种释放至少来自两个方面:其一,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  水平的降低导致了底泥脲酶活性加速;其二,藻体分解进入上覆水或底泥表面的残体中的脲酶量增加。

#### 4 结论

(1) 莱茵衣藻在大量增殖过程中部分藻体会沉降到底泥表层,沉降过程中大部分藻体死亡,少量藻体聚集在底泥表面,当养分增加时这部分藻体再次增殖并悬浮于水体中。

(2) 莱茵衣藻在增殖、沉降与死亡过程中,大量消耗水体与底泥中的  $\text{NO}_3^--\text{N}$  与  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,底泥中脲酶活性明显加强,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的释放速率被明显加快;上覆水  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  累积消耗量与底泥脲酶活性呈显著正相关关系。

#### 参考文献:

- [1] 朱广伟. 太湖富营养化现状及原因分析[J]. 湖泊科学, 2008, 20(1): 21-26.  
ZHU Guang-wei. Eutrophic status and causing factors for a large, shallow and subtropical Lake Taihu, China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, 20(1): 21-26.
- [2] 逢 勇, 韩 涛, 李一平, 等. 太湖底泥营养要素动态释放模拟和模型计算[J]. 环境科学, 2007, 28(9): 1960-1964.  
PANG Yong, HAN Tao, LI Yi-ping, et al. Simulation and model computation on dynamic release of nutrition factors of bottom mud in Taihu Lake[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(9): 1960-1964.
- [3] JIANG Xia, JIN Xiang-can, YAO Yang, et al. Effects of biological activity, light, temperature and oxygen on phosphorus release processes at the sediment and water interface of Taihu Lake, China[J]. *Water Research*, 2008, 42: 2251-2259.
- [4] Gerhardt S, Boos K, Schink B. Uptake and release of phosphate by littoral sediment of a freshwater lake under the influence of light or mechanical perturbation[J]. *Journal of Limnology*, 2010, 1(69): 54-63.
- [5] Patrick Schultz, Noel R Urban. Effects of bacterial dynamics on organic matter decomposition and nutrient release from sediments: A modeling study[J]. *Ecological Modelling*, 2008, 210: 1-14.
- [6] WU Xiang, YANG Xiao-e, Zed Rengel. Phytoremediation facilitates removal of nitrogen and phosphorus from eutrophicated water and release from sediment[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 1-4 (157): 277-285.
- [7] 孙小静, 秦伯强, 朱光伟. 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.
- [8] 关松荫, 等. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.  
GUAN Song-yin, et al. Soil enzymes and the research method[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986.
- [9] 周礼恺, 等. 土壤酶学[M]. 北京: 科学出版社, 1987.  
ZHOU Li-kai, et al. Soil enzyme[M]. Beijing: Science Press, 1987.
- [10] 张晓峰, 孔繁翔, 等. 太湖梅梁湾水华蓝藻复苏过程的研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(7): 1346-1350.  
ZHANG Xiao-feng, KONG Fan-xiang, et al. Recruitment dynamics of bloom forming cyanobacteria in Meiliang Bay of Taihu Lake[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(7): 1346-1350.
- [11] 章宗涉, 等. 淡水浮游生物研究方法[M]. 上海: 上海科学出版社, 1991: 345-348.  
ZHANG Zong-she, et al. Research methods of freshwater plankton[M]. Shanghai: Shanghai Science Press, 1991: 345-348.
- [12] 阎 荣, 孔繁翔, 等. 太湖底泥表层越冬藻类群落动态的荧光分析法初步测定[J]. 湖泊科学, 2004, 16(2): 163-168.  
YAN Rong, KONG Fan-xiang, et al. Analysis of the recruitment of the winter survival algae on the sediments of lake Taihu by fluorometry[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2004, 16(2): 163-168.