铜锈环棱螺对藻华水体沉积物-水界面营养盐通量的影响*

孙思志 郑忠明** 陆开宏 金春华 朱津永 胡智勇
(宁波大学教育部应用海洋生物技术重点试验室, 浙江宁波 315211)

摘 要 于2008年在室内小型试验模拟生态系统中进行了为期1个月的铜锈环棱螺生物干扰对底泥耗氧率和上覆水营养盐通量的影响试验,根据铜锈环棱螺放养密度设置了3个处理组和1个对照组。与试验前相比,培养1个月后,所有处理组和对照组的底泥耗氧率均显著下降;各处理组的底泥耗氧率初期高于对照组,后期低于对照组,且密度高的处理组其底泥耗氧率高于密度低的处理组。除12月7日外,对照组沉积物始终向上覆水释放铵氮,且释放量逐渐减小,而各处理组中,除试验初期沉积物向上覆水释放铵氮外,试验中后期均表现为吸收铵氮。除试验初期外,处理组和对照组中亚硝酸盐+硝酸盐通量主要表现为向上覆水中释放,且处理组1与对照组间存在显著差异($P<0.05$)。磷酸盐通量主要表现为,试验初期沉积物向上覆水中释放,后期被沉积物吸收。本试验结果表明,短期内铜锈环棱螺的生物干扰增加了底泥耗氧率,但其长期效应可使底泥耗氧率下降,铜锈环棱螺的存在促进了沉积物中的总体硝化速率,加快了沉积物中的N循环。

关键词 铜锈环棱螺;藻华水体;底泥耗氧率;沉积物-水界面;营养盐通量
中图分类号 S963 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2010)4-0730-05

Effects of *Bellamya aeruginosa* bioturbation on nutrient fluxes across sediment-water interface of algal bloom water body. SUN Si-zhi, ZHENG Zhong-ming, LU Kai-hong, JIN Chun-hua, ZHU Jin-yong, HU Zhi-yong (*Key Laboratory of Applied Marine Biotechnology, Ministry of Education, Ningbo University, Ningbo* 315211, *Zhejiang, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2010,**29**(4):730-734.

Abstract: A one-month laboratory experiment was conducted to study the effects of *Bellamya aeruginosa* bioturbation on the sediment oxygen consumption rate and overlying water nutrient fluxes in a simulated algal bloom water body. Three treatment groups and one control group were set up in the experiment, according to the stocking density of *B. aeruginosa*. Throughout the trial period, the sediment oxygen consumption (SOC) rate in treatment and control groups declined significantly. The SOC rate in treatment groups was higher than that in control group at the initial stage of the experiment, but lower than that in the control group at the late stage of the experiment. The treatment groups with high density *B. aeruginosa* showed a higher SOC rate than the treatment groups with low-density *B. aeruginosa*. In control group, ammonium always released from the sediment to the overlying water, and the release rate decreased gradually; while in treatment groups, ammonium was released to the overlying water at initial stage but absorbed by the sediment at middle and late stages of the experiment. Except at the initial stage of the experiment, the fluxes of nitrite and nitrate in all treatment groups and control group were mainly released to overlying water, and there was a significant difference between treatment group 1 and control group. Phosphate was released from the sediment at early stage, and was absorbed into sediment by the end of the experiment. This study revealed that the bioturbation of *B. aeruginosa* increased the SOC rate at the beginning but decreased the SOC rate by the end of the experiment,

* 国家自然科学基金项目(30771658)、浙江省自然科学基金项目(Y3090640)和宁波大学人才工程资助项目(博士基金)(2009919)。
** 通讯作者 E-mail: zhengzhongming@nbu.edu.cn
收稿日期: 2009-09-07 接受日期: 2009-12-18

and the existence of *B. aeruginosa* enhanced the overall sediment nitrification rate, consequently speeded the sediment-water N cycling.

Key words: *Bellamya aeruginosa*; algal bloom water body; sediment oxygen consumption; sediment-water interface; nutrient flux.

随着社会经济的快速发展,以及工业化、农业化进程的加速,N、P 等营养盐的排放量日益增加,加剧了湖泊、池塘等水体的富营养化程度,使水体的生态环境恶化,进而破坏水体原有生态平衡和生物多样性,大大加速了湖泊、池塘等水体的功能退化(Sedmak & Kosi,1998)。目前,我国的天然表面水体的富营养化率已高达 30%,江河的富营养化甚至已与沿海的赤潮连在一起,富营养化是我国水体最严重的污染之一(张伟和杨秀山,2001),对我国经济和社会的可持续发展造成了重大影响。因此,必须采取切实有效的措施进行预防和综合治理,遏止蓝藻爆发,减缓湖泊、池塘等水体富营养化进程,使水质好转。

铜锈环棱螺(*Bellamya aeruginosa*)是我国淡水水体中分布最广、产量最高的淡水软体动物之一,且具有较高的食用价值。螺类作为淡水生态系统中重要的底栖动物,一般认为其取食活动对水体藻类的群落组成及其生产力有强烈的影响(朱生博等,2008)。事实上,螺类的爬行、摄食与生理代谢等生物干扰显著影响着水体沉积物-水界面的营养盐通量,继而影响水层中包括颗粒悬浮物、营养盐和浮游藻类的种类和数量(Habdija *et al.*,1995),底栖生物的存在能使池塘底质垂直结构合理化,底栖生物通过摄食、排泄、挖洞或建立管状洞穴结构等途经而改变底质的间隙率、表面组成、沉积能力,以及提高底质吸收重金属离子的能力(Thayer, 1979; Sun & Torgersen,2001)。底栖生物可使不同类群的细菌同时存在于不同氧化还原条件的、毗邻的、有氧或缺氧的微环境中(Aller,1982);影响多种化学反应过程,丰富底泥中的微型和小型底栖生物群落。其生物干扰可促进底泥的硝化、反硝化作用的耦合及为氮和金属离子的还原反应创建有利的环境条件(Hulth *et al.*,2005)。因此,底栖螺类在构建水生群落结构和食物链传递中发挥着重要作用。

国内有关铜锈环棱螺对水环境中生源要素和初级生产力影响的研究有零星报道。研究表明,铜锈环棱螺可以在极短时间内澄清水体,显著提高水质透明度,对水体营养盐含量的影响主要表现为对营养盐的降解(魏阳春和濮培民,1999;朱苗骏等,2004)。本试验通过在室内建立的小型模拟生态系统中,定量研究了底泥-水界面营养盐通量和底泥耗氧率,以期为水体富营养化的治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

在试验室内构建一小型模拟生态系统:选容积约为 300 L 的大塑料桶 1 个,注入约 80% 的培养水,培养水采自宁波大学校园一个爆发蓝藻水华的池塘。大桶内放 12 个可密封的长方体聚乙烯培养柱(长×宽×高为:12.5 cm×12.5 cm×25 cm),培养柱侧壁装一个磁力搅拌子,培养柱内铺上约 7 cm 厚的底泥(图 1),底泥采自上述蓝藻水华池塘,用孔径为 1 mm 筛绢过滤以除去杂质及大型底栖动物,并将其充分混匀。试验所用铜锈环棱螺采自宁波市江北区姚江流域,选取贝壳完整,健康个体,小心洗刷去除表面附着物,挑选大小相近的螺用于本试验,试验开始前先把试验螺放在铺有底泥的水族箱内暂养 1 周,使其适应底泥生境。

1.2 试验方法

试验于 2008 年 11 月 21 日开始,把上述暂养过的试验螺按下列放养密度放入大塑料桶内的聚乙烯培养柱内,处理组1:1个螺·柱$^{-1}$(相当于64 ind·

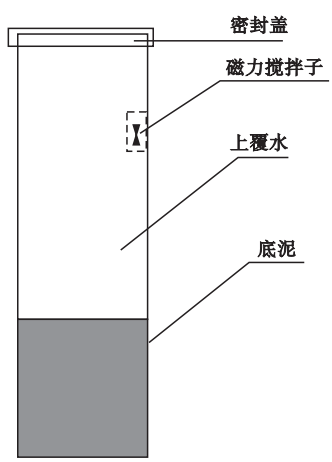


图 1 聚乙烯培养柱侧面示意图

Fig. 1 Diagram of incubation column

m^{-2}),处理组2:2个螺·柱$^{-1}$(相当于128 ind·m^{-2}),处理组3:3个螺·柱$^{-1}$(相当于192 ind·m^{-2}),对照组:有泥无螺对照组。每组3个重复。各培养柱放入试验螺后上口端去掉密封盖并用尼龙网(孔径0.5 cm)覆盖以防螺外逃。试验开始后每天用池塘藻华原水和室内培养的铜绿微囊藻液置换约1/4的大桶内培养水,以保持该模拟生态系统中有106 cells·L^{-1}的蓝藻。大桶内水温用加热棒维持在(23±1) ℃,24 h充气,试验至12月21日结束。

1.3 营养盐通量测定

分别在11月27日、12月2日、12月7日、12月12日、12月21日进行各培养柱内底泥-水界面营养盐通量速率和底泥呼吸速率的测定,测定方法如下:每次通量测定试验开始时,先关闭对大桶内的充气,除去各培养柱上口端的网片,然后用密封盖盖住培养柱(图1),另用3个空培养柱(无底泥)放入与各试验组相对应数量的螺并装满大桶内的培养水,然后密封,作为通量测定时的空白对照,用来消除铜锈环棱螺自身新陈代谢作用下的耗氧率和排氨率的影响。在黑暗、水浴条件下培养4 h,同时用磁力搅拌器缓慢搅拌各培养柱内的上覆水,以使各培养柱上覆水的营养盐、溶解氧(DO)等分布均匀。试验结束后,先用YSI55(USA)测定各培养柱上覆水的DO浓度,然后取水样并立即用孔径为0.45 μm的混合纤维滤膜抽滤用于营养盐浓度测定,装有底泥及试验螺的培养柱去掉密封盖及加盖网片后重新放回原大桶内继续充气培养。水样中的铵氮(NH_4^+-N)用靛酚蓝法测定,硝酸氮(NO_2^--N,NO_3^--N)用镉柱还原法测定(GB 17378.4-1998-39),可溶性磷酸盐(DIP)用磷钼蓝法测定(邢殿楼等,2006),各营养盐均用全自动间断化学分析仪SMART CHEM (France)测定。

1.4 数据处理

氧、营养盐通量根据下面公式计算(Zheng *et al.*,2009):

$$F = \frac{\Delta C \cdot V}{A \cdot t}$$

式中:F为氧(即底泥呼吸)、营养盐通量;ΔC为培养前后氧、营养盐浓度的变化(同时用空白对照校正);V为培养器中上覆水的体积;A为培养器底部的横截面积;t为培养时间。

在Microsoft Excel 2003上对所有数据进行处理,运用SPSS 13.0对数据进行统计分析,底泥耗氧率和营养盐通量先进行单因素方差分析(one-way ANOVA),然后进行Duncan多重比较,并运用Origin 8.0进行绘图。

2 结果与分析

2.1 视觉观察

试验初期(11月27日前)铜锈环棱螺,大部分时间都附在培养柱侧壁或者底泥表面;试验中后期(12月2日以后),大部分环棱螺都钻入约1~2 cm深的底泥中栖息,很少看到铜锈环棱螺附在培养柱侧壁或者底泥表面。试验结束后,对照组沉积物表面光滑,有一薄层红色氧化带,而处理组沉积物表面较粗糙,留有铜锈环棱螺的爬痕,且在1~3 cm深处有一层红棕色氧化带。

2.2 底泥耗氧率和营养盐通量

比较试验前后,对照组和各处理组的底泥耗氧率均呈显著下降的趋势,试验后期(12月12日,12月21日)各组底泥耗氧率显著低于前期(11月27日)($P<0.05$)。比较同一采样时间内的对照组和处理组,对照组的底泥耗氧率均高于同期处理组,且铜锈环棱螺密度高的处理组要高于密度低的处理组(图2a)。

在整个试验过程中,除12月7日取样外,对照组中沉积物均始终向上覆水释放铵氮,且释放量逐渐减小,而处理组中,除11月27日是沉积物向上覆水释放铵氮外,另外4次取样时均为吸收铵氮(图2b)。在12月2日、12月7日、12月21日3次取样时,铵氮通量在处理组和对照组中的存在显著差异($P<0.05$)。

试验前期(11月27日)对照组和各处理的底泥-水界面亚硝酸盐+硝酸盐通量表现为被底泥吸收,而12月2日后,均表现为向上覆水中释放(图2c)。在整个试验期间,除12月21日外,处理组与对照组都存在显著差异($P<0.05$)(图2c)。试验后期(12月12日,12月21日)处理组1亚硝酸盐+硝酸盐通量显著小于处理组2和处理组3。

磷酸盐通量主要表现为,试验初期(11月27日)沉积物向上覆水中释放,后期(12月7日后)被沉积物吸收(图2d)。除11月27日取样外,在其他4次取样时各处理组与对照组存在显著差异($P<0.05$)(图2d)。

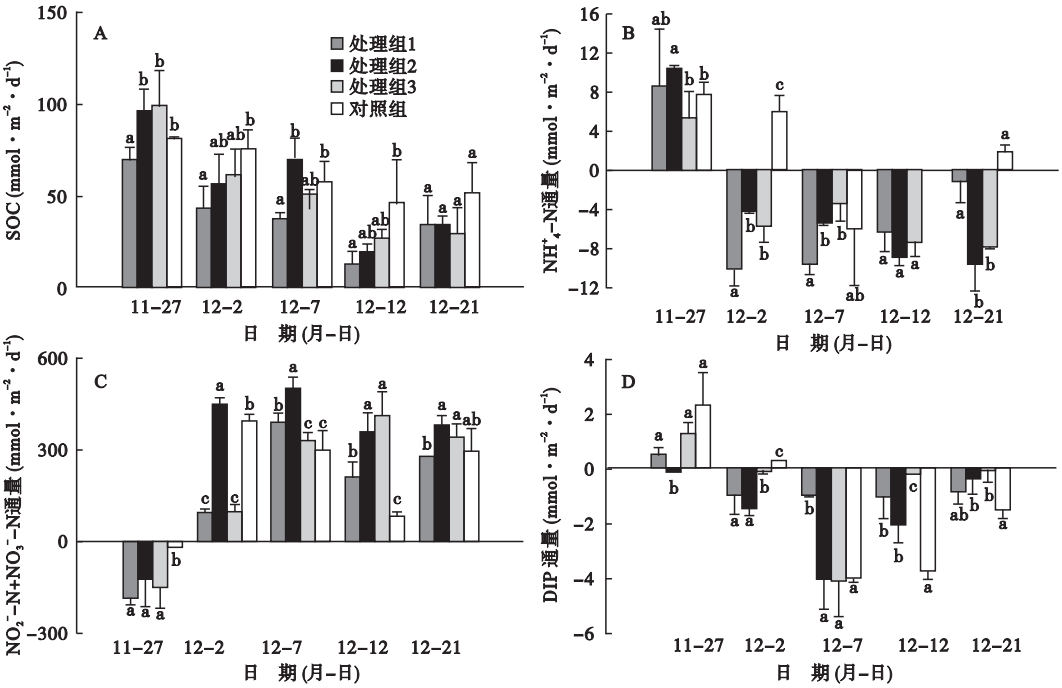


图 2 试验期间各试验组中各通量变化

Fig. 2 Benthic fluxes with different density treatments during the experiment

不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

3 讨 论

大型底栖动物活动,如掘穴、生物冲洗、沉积物再加工,刺激了氧气向沉积物中扩散。这不仅为其呼吸提供氧气,而且使周围环境产生了氧化带。它们还能通过摄食、呼吸、排泄等行为改变沉积物的生物和物理化学性质(Aller,1980)。由于底栖动物的掘穴活动所造成的掘穴通气和增加的表面氧化-厌氧层,加快了微生物活动速率,其结果促进了营养盐在沉积物与上覆水之间的流通。研究表明,大型底栖动物加快沉积物中微生物的新陈代谢和有机质的分解能力,如颗粒物质重新分布、加快间隙水向上覆水的扩散和不稳定粘液的分泌(Aller & Aller,1998)。本试验中,对照组沉积物表面光滑,有一薄层红色氧化带,而处理组沉积物表面较粗糙,留有铜锈环棱螺的爬痕,且有一层红棕色氧化带。这证实了生物扰动能改变底泥的结构和理化性质,且促进了氧气向沉积物中渗透。

底泥耗氧率通常与沉积物中有机质含量成正比,有机质越丰富,微生物活动加剧,底泥耗氧率也越大(Boyd,1995)。大型底栖生物的存在,一方面通过其对颗粒有机质的摄食、同化来减少有机质的含量,另一方面,由于其代谢作用,不断向水体中排泄代谢废物,增加底质中的有机质含量。本试验中,比较试验前后,对照组和各处理组的底泥耗氧率均有显著下降的趋势,试验后期(12 月 12 日,12 月 21 日)各组底泥耗氧率显著低于前期。可能是由于前期铜锈环棱螺的存在,增加了有机质含量的同时,改变了底泥的结构和理化性质,加快了底泥中好氧微生物的活动,从而提高了底泥耗氧率。Altmann 等(2004)报道,存在昆虫幼体的试验组中其底泥耗氧量(0.915 ± 0.236) mmol · m^{-2} · h^{-1}要明显高于对照组(0.489 ± 0.183) mmol · m^{-2} · h^{-1}。而试验后期,试验组底泥耗氧量的下降可能是由于铜锈环棱螺摄食和同化作用增加,从而减少了沉积物中有机质的含量。

硝化作用,即由微生物介导的将 NH_4^+-N 转化成 NO_3^--N,在水环境中对 N 循环有重要作用,它可以将有机质矿化产物 NH_4^+-N 转化成 NO_3^--N 再循环到周围环境中。特别对于富营养化水体来说,从沉积物中消除 N 污染,硝化反应是一个重要的必不可少的过程(Altmann *et al.*,2004)。沉积物中生物扰动增加了泥-水界面硝化细菌繁殖场所,生物冲洗增加了洞穴周围基质的有效性,有利于硝化作用进行。Rysgaard 等(1995)指出大型底栖动物的存在,刺激了硝化反应速率或是加快了硝化反应-反硝化

反应的耦合。大量底栖动物的洞穴管道壁与氧化表面和缺氧的沉积物相比,其上附着的活性微生物数量更多(Papaspyrou *et al.*,2005)。已有研究在磷脂脂肪酸分析或者核酸分析的基础上对洞穴管道中的微生物群落进行调查,大部分报道显示这些沉积物中洞穴管道壁上附着的微生物群落显著不同,生物扰动加快了微生物的活动速率,刺激了硝化反应的发生(Marinelli *et al.*, 2002; Papaspyrou *et al.*, 2005)。本试验中,在铜锈环棱螺的生物干扰下,处理组和对照组底泥-水界面的氮通量存在显著差异:除试验初期(11月27日)外,处理组表现出 NH_4^+-N 被沉积物吸收,进而向上覆水中释放 NO_2^--N + NO_3^--N,而对照组中 NO_2^--N+NO_3^--N 表现为从沉积物中释放。因此,这一结果可能是由于铜锈环棱螺的生物干扰使得底质环境发生了变化,从而促进了底泥硝化作用速率。

沉积物和上覆水之间存在着一种吸收和释放的动态平衡。一般认为沉积物中磷的浓度较大,从而形成一个向上的浓度梯度,这是造成沉积物释放的一个客观条件。影响溶解态无机磷酸盐释放的因子主要有溶解氧、pH、温度、扰动、生物活性等(韩沙沙和温琰茂,2004),但扰动对磷酸盐释放的影响最大,Bates 和 Neafus(1980)提出,在其他条件(溶解氧、pH 值等)相同的情况下,扰动使沉积物中磷的释放量增大了2倍。因此,本研究中,在铜锈环棱螺较强的生物扰动下,造成底泥中的颗粒有机质再悬浮,磷酸盐在试验初期(11月27日)表现为向上覆水中释放,而在试验中后期(12月2日以后),磷酸盐表现为被沉积物吸收,其原因可能为生物扰动作用逐渐减弱。而在扰动作用消失后,其他影响因子又成了主要影响因子。

参考文献

韩沙沙, 温琰茂. 2004. 富营养化水体沉积物中磷的释放及其影响因素. 生态学杂志, **23**(2): 98-101.

魏阳春, 濮培民. 1999. 太湖铜锈环棱螺对氮磷的降解作用. 长江流域资源与环境, **8**(1): 88-93.

邢殿楼, 霍堂斌, 吴会民, 等. 2006. 总磷、总氮联合消化的测定方法. 大连水产学院学报, **21**(3): 219-225.

张 伟, 杨秀山. 2001. 水体的富营养化及其治理. 生物学通报, **36**(11): 20-21.

朱苗骏, 柏如法, 张彤晴, 等. 2004. 不同密度铜锈环棱螺对水体环境影响效果的研究. 淡水渔业, **34**(6): 31-33.

朱生博, 王 岩, 王小冬, 等. 2008. 不同放养和管理模式下三角帆蚌养殖水体中的浮游生物和初级生产力. 生态学杂志, **27**(3): 401-407.

Aller RC, Aller JY. 1998. The effect of biogenic irrigation intensity and solute exchange on diagenetic reaction rates in marine sediments. *Journal of Marine Research*, **56**: 905-936.

Aller RC. 1980. Diagenetic processes near the sediment-water interface of Long Island Sound. Ⅱ. Fe and Mn. *Advance in Geophysics*, **22**: 351-415.

Aller RC. 1982. The effects of macrobenthos on chemical properties of marine sediment and overlying water// McCall PL, Tevesz MJ, eds. Animal-Sediment Relations. New York: Plenum Press: 53-102.

Altmann D, Stief P, Amann R, *et al*. 2004. Nitrification in freshwater sediments as influenced by insect larvae: Quantification by microsensors and fluorescence *in situ* hybridization. *Microbial Ecology*, **48**: 145-153.

Bates MH, Neafus NJE. 1980. Phosphorus release from sediments from Lake Carl Blackwell, Oklahoma. *Water Research*, **14**: 1477-1481.

Boyd CE. 1995. Bottom Soils, Sediment, and Pond Aquaculture. New York: Chapman & Hall.

Habdija I, Latjner J, Belinic I. 1995. The contribution of gastropod biomass in macrobenthic communities of a karstic river. *International Review of Hyddrobiology*, **80**: 103-110.

Hulth S, Aller RC, Canfield DE, *et al*. 2005. Nitrogen removal in marine environments: Recent findings and future research challenges. *Marine Chemistry*, **94**: 125-145.

Marinelli RL, Lovell CR, Wakeham SG, *et al*. 2002. Experimental investigation of the control of bacterial community composition in macrofaunal burrows. *Marine Ecology Progress Series*, **235**: 1-13.

Papaspyrou S, Gregersen T, Cox RP, *et al*. 2005. Sediment properties and bacterial community in the burrows of the mud shrimp *Pestarella tyrrhena* (Decapoda: Thalassinidea). *Aquatic Microbial Ecology*, **38**: 181-190.

Rysgaard S, Christensen PB, Nielsen LP, *et al*. 1995. Seasonal variation in nitrification and denitrification in estuarine sediment colonized by benthic microalgae and bioturbating infauna. *Marine Ecology Progress Series*, **126**: 111-121.

Sedmak B, Kosi G. 1998. The role of microcystins in heavy cyanobacterial bloom formation. *Journal of Plankton Research*, **20**: 691-708.

Sun Y, Torgersen T. 2001. Adsorption-desorption reactions and bioturbation transport of 224Ra in marine sediments: A one-dimensional model with applications. *Marine Chemistry*, **74**: 227-243.

Thayer CW. 1979. Biological bulldozers and the evolution of marine benthic communities. *Science*, **203**: 458-461.

Zheng ZM, Dong SL, Tian XL, *et al*. 2009. Sediment-water fluxes of nutrients and dissolved organic carbon in extensive sea cucumber culture ponds. *Clean: Soil, Air, Water*, **37**: 218-224.

作者简介 孙思志,男,1982年生,硕士研究生,主要从事水生生物学研究。E-mail: sunsizhi120@163.com

责任编辑 魏中青