

# 缢蛭扰动对柱状沉积物中氮形态及其含量影响的 实验室模拟研究

张 硕<sup>1,2</sup>, 唐明蕊<sup>1</sup>, 路吉坤<sup>3</sup>, 黄 宏<sup>4</sup>

(1.上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2.大洋渔业资源可持续开发省部共建教育部重点实验室, 上海 201306; 3.连云港市海洋与渔业发展促进中心, 江苏 连云港 222000; 4.上海海洋大学 海洋生态与环境学院, 上海 201306)

**摘 要:** 本文采用底栖生物缢蛭的室内培养实验, 研究生物扰动对柱状沉积物中氮形态及其含量的影响。实验设置了两个生物栖息密度 (99 ind./m<sup>2</sup>, 249 ind./m<sup>2</sup>) 和空白对照, 在水温为 23 °C, 盐度为 26, pH 为 8 的条件下, 进行了 20 d 的室内模拟生物扰动培养。实验结束后将柱状沉积物从上到下分层切割, 提取氮形态并测定其含量。结果表明, 扰动后沉积物中总氮 (TN) 含量增加, 其中不可转化态氮 (NTN) 含量增加了 30.94%, 可转化态氮 (TTN) 含量降低了 20.57%。有机态和硫化物结合态氮 (OSF-N) 是 TTN 的主要赋存形态, 占 TN 的 9.31%, 碳酸盐结合态氮 (CF-N) 的含量最低, 占 TN 的 2.77%, 离子交换态氮 (IEF-N) 和铁锰氧化态氮 (IMOF-N) 分别占 TN 的 3.39% 和 3.06%。综上所述, 缢蛭扰动促进了沉积物中 OSF-N 向其他形态的转化以及 TTN 向 NTN 的转化。

**关键词:** 生物扰动; 沉积物; 氮形态; 缢蛭

中图分类号: P736; Q178.53 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2020)05-0670-06

## A laboratory experimental research into the bioturbation effects of *Sinonovacula constricta* on the content of nitrogen forms in columnar sediments

ZHANG Shuo<sup>1,2</sup>, TANG Ming-rui<sup>1</sup>, LU Ji-kun<sup>3</sup>, HUANG Hong<sup>4</sup>

(1.College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2.Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China; 3.Lianyungang Marine and Fishery Development Promotion Center, Lianyungang 222000, China; 4.Marine Ecology and Environment College, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** The bioturbation effects of *Sinonovacula constricta* on the transformation of different forms of nitrogen in sediments were studied based on a laboratory experiment in this study. Two treatment groups and a control group were set up according to different biological densities (99 ind./m<sup>2</sup>, 249 ind./m<sup>2</sup>), and a 20-day laboratory experiment was carried out in the condition of water temperature 23 °C, salinity 26 psu, and pH8. The columnar sediments were stratified and cut from top to bottom, and the changes of different forms of nitrogen content in the sediment were analyzed. Results showed that the content of total nitrogen (TN) in the sediment increased after the bioturbation of *S. constricta*. The content of non-transferable total nitrogen (NTN) increased by 30.94%, and the content of transferable total nitrogen (TTN) decreased by 20.57%. The content of

收稿日期: 2019-04-16, 修订日期: 2019-05-23

基金项目: 海州湾国家级海洋牧场示范项目 (LYGD20170921025)

作者简介: 张 硕 (1976—), 男, 天津人, 教授, 博士, 主要从事海洋牧场和人工鱼礁方面的基础理论与应用实践研究, E-mail: s-zhang@shou.edu.cn

通讯作者: 黄 宏 (1974—), 女, 副教授, 主要从事海洋环境方面的研究, E-mail: hhuang@shou.edu.cn

organic-sulphide form (OSF-N) was the highest among the four forms, accounting for 9.31% of TN, which was the main form of TTN. The content of carbonate form (CF-N) was the lowest and only 2.77% of TN. The ion exchange form (IEF-N) and the iron manganese oxide form (IMOF-N) accounted for 3.39% and 3.06% of TN, respectively. Above all, the bioturbation of *S. constricta* promoted the conversion of OSF-N to other forms, as well as the conversion of transferable total nitrogen to non-transferable total nitrogen.

**Key words:** bioturbation; sediments; nitrogen forms; *Sinonovacula constricta*

底栖生物和沉积物是海洋生态系统中重要的组成部分,氮作为海洋初级生产力中不可缺少的元素,与底栖生物有着密不可分的关系。沉积物易受到环境因素的影响从而性质发生改变,生物扰动就是其中重要的因素之一。在早期的生物扰动研究中,杜永芬等人<sup>[1]</sup>对菲律宾蛤仔、吕洪斌等<sup>[2]</sup>对丝鳃虫和菲律宾蛤仔、于子山等<sup>[3]</sup>对紫彩雪蛤进行了研究,发现底栖生物扰动直接作用于沉积物,能够让沉积物在垂直方向进行混合、搬运,改变其物理结构。之后的研究发现,生物扰动能影响沉积物的化学性质,郑余琦等<sup>[4]</sup>研究发现缢蛭扰动对沉积物磷赋存形态具有显著的影响,聂小保等<sup>[5]</sup>发现颤蚓生物扰动能促进沉积物中 TN 的释放,还有研究表明底栖生物的扰动作用能够影响沉积物中氮的硝化与反硝化过程<sup>[6-7]</sup>,部分底栖生物能够显著提高反硝化速率<sup>[8]</sup>,邓可<sup>[9]</sup>等对菲律宾蛤仔的研究发现其生物扰动对沉积物-水界面生源要素迁移存在影响,Regan Nicholas 等<sup>[10]</sup>发现青蛤生物扰动能够促进沉积物-水界面 N、P 营养盐的释放。

目前关于底栖生物扰动对沉积物氮的迁移转化、释放等方面的研究很多,但有关生物扰动对沉积物氮形态影响的研究还很少见。因此,本文开展底栖生物缢蛭的室内培养实验,通过分析缢蛭扰动前后柱状沉积物中不同形态氮的含量变化,来研究生物扰动对柱状沉积物中氮形态与含量的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品的采集与处理

海州湾位于中国黄海东南部,江苏省最北端,是一个半开阔海湾,沉积物主要以粉砂淤泥质为主,底栖生物资源丰富。实验所用沉积物于 2018 年 8 月采于海州湾海洋牧场区,用抓斗采泥器采集表层沉积物,混合均匀放入保温箱低温保存,运回实验室,然后将沉积物在 60 °C 烘

干(以去除微生物对实验的影响),去除杂质和石块较大颗粒后备用。

培养实验所用生物缢蛭购买于芦潮港海鲜市场,带回后用海水清洗表面泥沙以及附着生物,选择体长为(6.0±0.5)cm 健康完整的生物个体置于实验室循环水池中暂养 7 d,期间不间断曝气充氧,并投喂足量金藻,以保证缢蛭活性。

### 1.2 生物扰动实验

实验设置生物扰动组(低密度组、高密度组)和对照组,每组 3 个重复。首先将预处理好的沉积物用新鲜海水在室温下培养 7 d,让沉积物恢复到接近自然状态,然后将培养好的沉积物均匀放入直径 16 cm 的 PVC 管中,沉积物柱高 20 cm,在沉积物表层加入适量的海水继续培养 3 d,分别在生物扰动组的 PVC 管中放入缢蛭,低密度组放入两只缢蛭(99 ind./m<sup>2</sup>),高密度组放入 5 只缢蛭(249 ind./m<sup>2</sup>),进行生物扰动实验,培养周期为 20 d。培养实验期间对照组和生物扰动组均保持充氧,每日更新 1/3 的海水,金藻饵料隔天投喂一次,直至实验周期结束。

培养实验结束后,缓慢抽取上层海水,尽量避免引起表层沉积物的扰动。将 PVC 管中的柱状沉积物从上至下按照上层(0~5 cm 段)每 1 cm 分层;中层(5~13 cm 段)每 2 cm 分层;下层(13~21 cm 段)每 4 cm 分层取样、冷冻干燥、过 100 目筛,测定沉积物中各种形态氮的含量。

### 1.3 分析方法

总氮(total nitrogen, TN)测定采用凯氏定氮法,称取 1 g(精确到 0.001 g)沉积物于消解管中,经浓硫酸消解后放入凯式定氮仪中测定。

氮形态采用马红波等人<sup>[11]</sup>改进的分级提取方法,将氮分为可转化态氮(transferable total nitrogen, TTN)和不可转化态氮(non-transferable total nitrogen, NTN)。可转化态氮包括离子交换态氮(ion exchange form, IEF-N)、碳酸盐结合态

氮(carbonate form, CF-N)、铁锰氧化态氮(iron manganese oxide form, IMOF-N)、有机态和硫化物结合态氮(organic and sulphide form, OSF-N)。浸取液分别用 1 mol/L KCl、1 mol/L NaAc(pH=5)、0.1 mol/L NaOH、碱性  $K_2S_2O_8$ , 不同形态氮浸取液中的  $NH_4-N$  采用次溴酸盐氧化法测定,  $NO_3-N$  采用锌-镉还原法测定; 非转化态氮(NTN)由总氮(TN)减去可转化态氮(TTN)得到。

#### 1.4 数据处理

数据采用 SPSS 17.0 软件进行分析, 数据统计以及图表制作由 EXCEL 2010 进行。

## 2 结果与讨论

### 2.1 缢蛭扰动后沉积物各形态氮含量组成

表 1 是缢蛭扰动下各形态氮的含量变化。对照组和生物扰动组的 TN 含量均值分别为  $355.09 \times 10^{-6}$  和  $421.97 \times 10^{-6}$ 。与对照组相比, 生物扰动组沉积物中 TN 含量增加了 18.84%, 缢蛭扰

动促进了沉积物中 TN 含量的增加。NTN 是由 TN 减去 TTN 得来, 由于成分复杂, 性质稳定, 不容易浸取出来, 所以这部分氮很难参与到氮循环中。在扰动实验结束后沉积物中 NTN 含量增加了 30.94%, TTN 含量降低了 20.57%。TTN 中 OSF-N 的含量最高, 对照组和生物扰动组分别为  $52.20 \times 10^{-6}$  和  $26.24 \times 10^{-6}$ ; CF-N 含量最低, 对照组和生物扰动组分别为  $9.35 \times 10^{-6}$  和  $11.98 \times 10^{-6}$ ; IEF-N 对照组和生物扰动组分别为  $11.29 \times 10^{-6}$  和  $15.16 \times 10^{-6}$ ; IMOF-N 对照组和生物扰动组分别为  $10.62 \times 10^{-6}$  和  $12.91 \times 10^{-6}$ 。OSF-N 作为 TTN 的主要存在形式, 在缢蛭扰动后减少了 49.73%, 其他 3 种形态氮含量增加, 增加量分别为 34.29% (IEF-N)、28.16% (CF-N) 和 21.57% (IMOF-N), 这与 IEF-N、OSF-N、IMOF-N 的性质有关<sup>[12]</sup>。综上所述, 缢蛭扰动促进了沉积物中 OSF-N 向其他 3 种形态氮转化, 以及可转化态氮(TTN)向不可转化态氮(NTN)的转化。

表 1 缢蛭扰动下各形态氮的含量变化

Tab.1 The change of nitrogen form content under bioturbation in *Sinonovacula Constricta*

氮形态	IEF-N	CF-N	IMOF-N	OSF-N	NTN	TTN	TN
	$\times 10^{-6}$						
对照组	11.29	9.35	10.62	52.20	271.64	83.45	355.09
生物扰动组	低密度组	14.01	10.94	12.18	25.79	344.10	407.02
	高密度组	16.31	13.02	13.63	26.69	367.27	436.93
平均值	15.16	11.98	12.91	26.24	355.69	66.29	421.97
变化量/(%)	34.29	28.16	21.57	-49.73	30.94	-20.57	18.84

图 1 是上、中、下层沉积物中不同形态氮占 TN 的百分比。由图可知, NTN 占 TN 的比例为 70.45% ~ 85.91%, TTN 占 TN 的比例为 14.09% ~ 29.35%, 其中 OSF-N 占 TN 的比例最高, 为 5.63% ~ 20.83%, CF-N 占 TN 比例最低, 为 2.20% ~ 3.15%, IEF-N 和 IMOF-N 占 TN 的比例分别为 2.43% ~ 3.98% 和 2.48% ~ 3.89%。与对照组相比, 生物扰动组(高、低密度组)上、中、下层沉积物中 TN、NTN 含量都呈明显增加的趋势, TTN 含量减小, 其中 OSF-N 占 TN 的比例下降明显, 其他 3 种氮形态(IMOF-N、CF-N、IEF-N)占 TN 的比例增加。因此, 缢蛭扰动使沉积物氮中 TTN 占 TN 的比例减小, NTN 占 TN 的比例增加, 促进了 TTN 向 NTN 的转化。

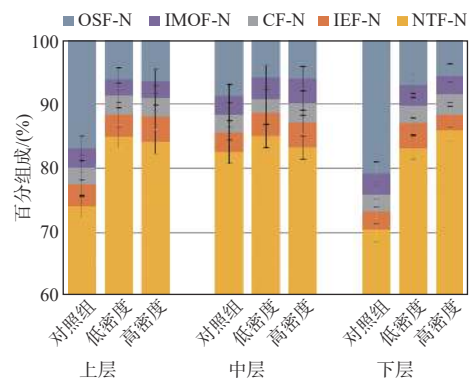


图 1 上、中、下层各形态氮的百分组成

Fig. 1 Percent composition of nitrogen in upper, middle and lower sediments

## 2.2 缢蛭生物扰对沉积物 TN 含量的影响

沉积物 TN 含量在  $322.00 \times 10^{-6}$  至  $483.00 \times 10^{-6}$  之间, 平均值为  $401.95 \times 10^{-6}$ , 对照组 TN 平均含量为  $355.09 \times 10^{-6}$ , 生物扰动组为  $425.37 \times 10^{-6}$  (低密度组为  $414.84 \times 10^{-6}$ , 高密度组为  $435.91 \times 10^{-6}$ ), 由图 2 可知, 高密度组 TN 含量明显大于低密度组, 大于对照组。缢蛭扰动对沉积物中 TN 的含量变化有影响, 且随着缢蛭生物密度的增加, TN 含量增加明显。从垂直方向上来看, 柱状沉积物中 TN 含量随深度的增加呈往复螺旋式变化, 低密度组的高值出现在 6 cm 和 12 cm 处, 高密度组的高值出现在 5 cm、10 cm 和 15 cm 深度, 与实验期间缢蛭栖息的深度一致, 因此缢蛭通过自身的生命活动对所栖息深度的沉积物产生了较大的影响, 并促进了沉积物中 TN 含量的增加。

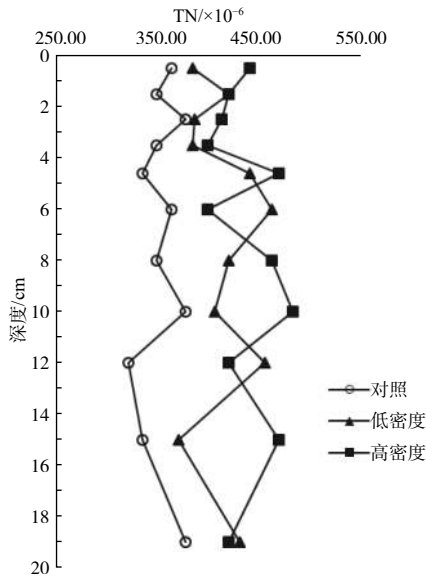


图 2 缢蛭扰动下沉积物 TN 的垂直分布

Fig. 2 The vertical distribution of TN in sediment under the bioturbation in *Sinonovacula constricta*

## 2.3 沉积物中不同形态氮含量的垂直分布

### 2.3.1 IEF-N

IEF-N 是结合能力较弱的氮形态, 却也是最容易浸取出来的氮形态, 主要由沉积物中  $\text{NH}_4\text{-N}$  的含量决定<sup>[13]</sup>。IEF-N 含量在  $9.56 \times 10^{-6}$  至  $27.51 \times 10^{-6}$  之间, 对照组平均  $11.29 \times 10^{-6}$ , 生物扰动组  $15.16 \times 10^{-6}$  (低密度组  $14.01 \times 10^{-6}$ ; 高密度组  $16.31 \times 10^{-6}$ )。由于采样时间为夏季, 海水中浮游生物含量较

高, 消耗了大量的氧气, 采集的沉积物处于还原环境<sup>[14]</sup>, 沉积物氮的反硝化作用占优势<sup>[15]</sup>, 因此经矿化作用产生的  $\text{NH}_4^+$  难被硝化, 所以对照组沉积物中 IEF-N 含量较低。高密度组 IEF-N 含量高于低密度组且明显高于对照组, 这是因为缢蛭的扰动改变了沉积物的物理结构以及理化性质<sup>[16]</sup>, 促进了沉积物中 IEF-N 含量的增加。如图 3a 所示, 从垂直方向来看, 对照组 IEF-N 含量在垂直方向上的变化较小, 高、低密度组的垂直变化趋势大致相同, 都是在 0~4 cm 的上层沉积物中垂直变化较小, 随着深度的增加在 5~7 cm 的中上层沉积物中 IEF-N 含量增加, 并在 6 cm 达到最大值, 而后下层沉积物中 IEF-N 含量的垂直变化变小。但低密度组在 6 cm 处的最大值异常的高, 可能是由于缢蛭栖息在此深度, 对该深度沉积物的扰动作用相较其他深度更强, 所以 IEF-N 含量突然增高。

### 2.3.2 IMOF-N

IMOF-N 含量变化与沉积物的氧化还原环境有关。IMOF-N 在还原条件下能够稳定存在, 在氧化环境下大量  $\text{Fe}^{2+}$  被氧化成  $\text{Fe}^{3+}$ , 沉积物中的氮更容易与  $\text{Fe}^{3+}$  结合, 因此在氧化环境下的 IMOF-N 含量较高。一般来说富氧的表层沉积物中 IMOF-N 含量较高, 随着深度的增加沉积物还原性增强, IMOF-N 含量会逐渐降低。IMOF-N 含量在  $7.67 \times 10^{-6}$  至  $21.39 \times 10^{-6}$  之间, 对照组平均值为  $10.62 \times 10^{-6}$ , 生物扰动组平均值为  $12.91 \times 10^{-6}$  (低密度组  $12.18 \times 10^{-6}$ ; 高密度组  $13.63 \times 10^{-6}$ )。从图 3b 中可以看出, 对照组 IMOF-N 含量随着深度的增加呈减小的趋势, 在 4 cm 处达到最小值, 而后含量在垂直方向上变化很小。高、低密度组的 IMOF-N 含量在垂直方向上的变化趋势相同, 都是随着深度的增加含量先减小, 然后在 3~10 cm 深度逐渐增大, 最大值均出现在 6 cm 处, 在 10 cm 以深 IMOF-N 在垂直方向上的含量变化又变小, 且高密度组的 IMOF-N 含量高于低密度组高于对照组。缢蛭的扰动作用使沉积物的物理结构变得松散, 有利于氧气的输送, 改变了沉积物的氧化还原环境<sup>[17]</sup>, 所以在缢蛭栖息的深度 IMOF-N 含量较高, 而且扰动强度较高的高密度组的含量也高于低密度组。



### 2.3.3 CF-N

CF-N的含量变化取决于沉积物中 $\text{CO}_3^{2-}$ 含量以及有机矿化作用,pH也是影响CF-N含量变化的重要因素<sup>[18]</sup>。本实验中沉积物pH变化较小,有机矿化作用弱,沉积物中的 $\text{CaCO}_3$ 不易溶解形成 $\text{CO}_3^{2-}$ ,很难生成CF-N,因此含量较低。CF-N含量为 $7.70 \times 10^{-6} \sim 16.20 \times 10^{-6}$ ,是4种氮形态中含量最低的。对照组平均 $9.35 \times 10^{-6}$ ,生物扰动组 $11.98 \times 10^{-6}$ (低密度组 $10.94 \times 10^{-6}$ ;高密度组

$13.02 \times 10^{-6}$ )。如图3c所示,除了低密度组在2~3 cm深度含量突然增大外,其他深度在垂直方向上的含量变化不明显,高密度组与对照组CF-N含量在垂直方向上的变化趋势相同,都是随着深度的增加,含量呈先减小后增大,然后又减小,直至保持不变的变化趋势,最大值出现在6 cm处,在8~16 cm深度生物扰动组与对照组的变化趋势相同,含量变化幅度都较小,在16 cm以深对照组和高密度组又突然增大,但其含量值与表层接近。

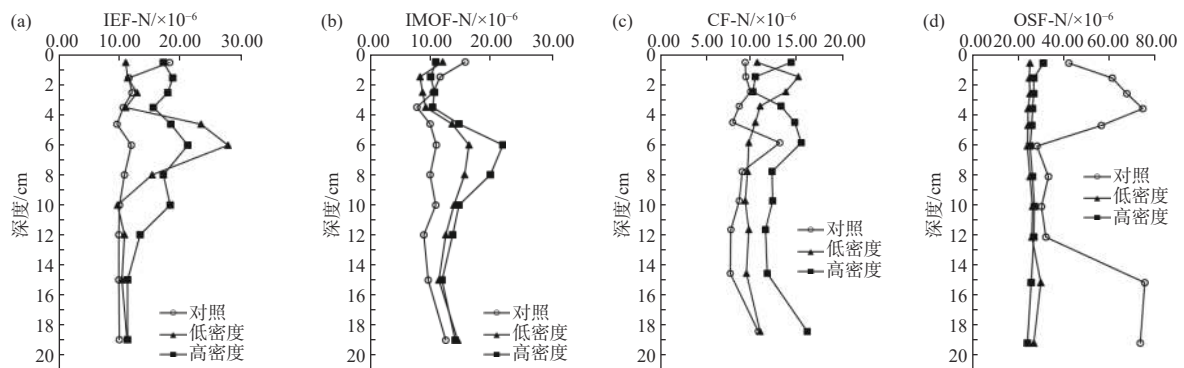


图3 四种氮形态含量的垂直分布

Fig. 3 The content of 4 nitrogen forms in vertical distribution.

### 2.3.4 OSF-N

OSF-N主要与沉积物的来源有关。OSF-N含量为 $24.10 \times 10^{-6} \sim 75.33 \times 10^{-6}$ ,对照组平均 $52.20 \times 10^{-6}$ ,生物扰动组 $26.24 \times 10^{-6}$ (低密度组 $25.79 \times 10^{-6}$ ;高密度组 $26.69 \times 10^{-6}$ ),是4种氮形态中含量最高的,也是TTN的主要存在形式。如图3d所示,对照组OSF-N含量随着深度的增加在0~4 cm深度增大而后降低,在6~12 cm深度含量基本保持不变,然后在13~21 cm的下层沉积物中OSF-N含量再次增大。生物扰动组OSF-N含量低于对照组,高、低密度组CF-N含量在垂直方向上变化相近,变化也不十分明显。OSF-N主要的变化机制目前还并不了解,但在沉积物处于缺氧状态时,有机物能够较好的保存,与之结合的OSF-N也能够比较稳定的保存在沉积物中,因此OSF-N含量的变化可能是由于缢蛏扰动破坏了其能稳定存在的环境条件。

## 3 结论

(1)缢蛏扰动增加了沉积物中TN的含量,扰动后沉积物的TN含量增加了18.84%。在垂

直方向上TN含量呈往复螺旋式变化,且生物扰动组明显高于对照组。尽管不同缢蛏生物密度对沉积物中TN的影响强度不同,但缢蛏扰动都表现为促进了沉积物中TN含量的增加。

(2)沉积物中的氮主要以OSF-N形态存在。缢蛏扰动促进了沉积物中OSF-N向其它形态氮的转化以及TTN向NTN的转化。从垂直方向上看,中上层沉积物中各形态氮的含量波动较大,4种形态氮含量的最大值都出现在6 cm附近,与实验过程中缢蛏栖息深度相吻合,也表明缢蛏扰动对沉积物氮形态的变化有显著影响。

(3)实验室模拟实验证明了缢蛏扰动对沉积物氮形态的变化有显著影响,沉积物和海水之间的联系密切,因此在未来开展缢蛏扰动对沉积物-水界面营养盐影响的研究也十分有意义。

## 参考文献:

- [1] 杜永芬,张志南. 菲律宾蛤仔的生物扰动对沉积物颗粒垂直分布的影响[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2004, 34(6): 988-992.
- [2] 吕洪斌,王恕桥,刘国山,等. 两种大型底栖动物生物扰动对沉积物颗粒垂直分布的影响[J]. 水生生态学杂志, 2016, 37(1):

- 78-86.
- [3] 于子山, 王诗红, 张志南, 等. 紫彩血蛤的生物扰动对沉积物颗粒垂直分布的影响[J]. 青岛海洋大学学报: 自然科学版, 1999, 29(2): 111-114.
- [4] 郑余琦, 郑忠明, 秦文娟. 缢蛭(*Sinonovacula constricta*)生物扰动对养殖废水处理系统中沉积物磷赋存形态垂直分布的影响[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(1): 161-170.
- [5] 聂小保, 吴淑娟, 吴方同, 等. 颤蚓生物扰动对沉积物氮释放的影响[J]. 环境科学学报, 2011, 31(1): 107-113.
- [6] ENOKSSON V, SAMUELSSON M O. Nitrification and dissimilatory ammonium production and their effects on nitrogen flux over the sediment-water interface in bioturbated coastal sediments[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1987, 36: 181-189.
- [7] PELEGRI S P, BLACKBURN T H. Bioturbation effects of the amphipod *Corophium volutator* on microbial nitrogen transformations in marine sediment[J]. *Marine Biology*, 1994, 121(2): 253-258.
- [8] GILBERT R, STORA G, BONIN P. Influence of bioturbation on denitrification activity in Mediterranean coastal sediments: an *in situ* experimental approach[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1998, 163: 99-107.
- [9] 邓 可, 刘素美, 张桂玲, 等. 菲律宾蛤仔养殖对胶州湾沉积物-水界面生源要素迁移的影响[J]. 环境科学, 2012, 33(3): 782-793.
- [10] NICHOLAUS R, ZHENG Z M. The effects of bioturbation by the Venus clam *Cyclina sinensis* on the fluxes of nutrients across the sediment-water interface in aquaculture ponds[J]. *Aquaculture International*, 2014, 22(2): 913-924.
- [11] 马红波, 宋金明, 吕晓霞, 等. 渤海沉积物中氮的形态及其在循环中的作用[J]. *地球化学*, 2003, 32(1): 48-54.
- [12] ZHENG G X, SONG J M, SUN Y M, et al. Characteristics of nitrogen forms in the surface sediments of southwestern Nansha trough, south china sea[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2008, 26(3): 280-288.
- [13] 周美玲, 张鉴达, 杨小雨, 等. 昌黎黄金海岸自然保护区海域表层沉积物中氮赋存形态分布特征[J]. 海洋环境科学, 2018, 37(5): 691-698.
- [14] 王功芹, 朱 珠, 张 硕. 海州湾表层沉积物中氮的赋存形态及其生态意义[J]. 环境科学学报, 2016, 36(2): 450-457.
- [15] 吕晓霞, 宋金明. 海洋沉积物中氮的形态及其生态学意义[J]. 海洋科学集刊, 2003, : 101-111.
- [16] CROEL R C, KNEITEL J M. Ecosystem-level effects of bioturbation by the tadpole shrimp *Lepidurus packardii* in temporary pond mesocosms[J]. *Hydrobiologia*, 2011, 665(1): 169-181.
- [17] WENZHÖFER F, GLUD R N. Small-scale spatial and temporal variability in coastal benthic O<sub>2</sub> dynamics: Effects of fauna activity[J]. *Limnology and Oceanography*, 2004, 49(5): 1471-1481.
- [18] 周天宇, 李浩帅, 简慧敏, 等. 长江口及邻近海域表层沉积物中氮形态的研究[J]. 海洋环境科学, 2018, 37(2): 281-286.

~~~~~

(上接第 669 页)

- [8] WANG C Y, LIANG S K, LI Y B, et al. The spatial distribution of dissolved and particulate heavy metals and their response to land-based inputs and tides in a semi-enclosed industrial embayment: Jiaozhou Bay, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(14): 10480-10495.
- [9] 毕世普, 孔祥淮, 张 勇, 等. 胶州湾浅表地层沉积物粒度特征及其环境意义[J]. 海洋地质前沿, 2015, 31(10): 1-7.
- [10] Method 200.2, Sample preparation procedure for spectrochemical analyses of total recoverable elements[S].
- [11] Method 200.7, Determination of metals and trace elements in water and wastes by inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry[S].
- [12] Method 7474, Mercury in sediment and tissue samples by atomic fluorescence spectrometry[S].
- [13] XIAO C L, JIAN H M, CHEN L F, et al. Toxic metal pollution in the Yellow Sea and Bohai Sea, China: distribution, controlling factors and potential risk[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 119(1): 381-389.
- [14] TUREKIAN K K, WEDEPOHL K H. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust[J]. *GSA Bulletin*, 1961, 72(2): 175-192.
- [15] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [16] WANG Y, YANG Z F, SHEN Z Y, et al. Assessment of heavy metals in sediments from a typical catchment of the Yangtze River, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 172(1/2/3/4): 407-417.
- [17] ZHANG J F, GAO X L. Heavy metals in surface sediments of the intertidal Laizhou Bay, Bohai Sea, China: distributions, sources and contamination assessment[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 98(1/2): 320-327.
- [18] LI Y B, DUAN Z W, LIU G L, et al. Evaluation of the possible sources and controlling factors of toxic metals/metalloids in the Florida everglades and their potential risk of exposure[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(16): 9714-9723.
- [19] 秦延文, 孟 伟, 郑丙辉, 等. 渤海湾天津段潮间带沉积物柱状样重金属污染特征[J]. 环境科学, 2006, 27(2): 268-273.
- [20] JAMSHIDI-ZANJANI A, SAEEDI M. Metal pollution assessment and multivariate analysis in sediment of Anzali international wetland[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 70(4): 1791-1808.
- [21] 汪亚平, 高 抒. 胶州湾沉积速率: 多种分析方法的对比[J]. *第四纪研究*, 2007, 27(5): 787-796.
- [22] WANG C Y, GUO J Q, LIANG S K, et al. Long-term variations of the riverine input of potentially toxic dissolved elements and the impacts on their distribution in Jiaozhou Bay, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(9): 8800-8816.