

# 秋季牟平海洋牧场及其邻近海域沉积物- 水界面营养盐交换通量

高天赐<sup>1,2</sup>, 高学鲁<sup>1,2</sup>, 邢前国<sup>1</sup>, 赵建民<sup>1</sup>

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 本研究于 2017 年 11 月在牟平海洋牧场及其邻近海域采集表层沉积物样品, 通过实验室模拟培养法估算了该季节沉积物-水界面营养盐的交换通量, 并研究了溶解氧与温度对交换通量的影响。结果表明, 目标海域沉积物水界面  $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$  的交换通量平均值分别为 1.01、-181.91、-268.41、-45.69  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ , 沉积物表现为  $\text{NO}_2\text{-N}$  的“源”,  $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$  的“汇”。溶解氧及温度均对交换通量有较大影响, 富氧条件下  $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$  交换通量大于贫氧条件,  $\text{NO}_3\text{-N}$  反之; 温度升高,  $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$  的交换通量增大,  $\text{PO}_4\text{-P}$  反之。

**关键词:** 牟平海洋牧场; 营养盐; 沉积物-水界面; 交换通量

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2020)03-0387-06

DOI:10.13634/j.cnki.mes.2020.03.010

## Exchange fluxes of nutrients across sediment-water interface in the Muping Marine Ranch and its adjacent waters in autumn

GAO Tian-ci<sup>1,2</sup>, GAO Xue-lu<sup>1,2</sup>, XING Qian-guo<sup>1</sup>, ZHAO Jian-min<sup>1</sup>

(1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In this research, the surface sediment samples were collected from the Muping Marine Ranch and its adjacent area in November 2017. The exchange fluxes of nutrients across the sediment-water interface were estimated by a laboratory incubation method. In addition, the effects of dissolved oxygen and temperature on the fluxes were also studied. The results indicated that the average exchange fluxes of  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$  and  $\text{PO}_4\text{-P}$  across sediment-water interface were 1.01, -181.91, -268.41 and -45.69  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ , respectively. The sediments acted as a “source” of  $\text{NO}_2\text{-N}$  and a “sink” of  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$  and  $\text{PO}_4\text{-P}$ . Both dissolved oxygen and temperature had obvious influence on the fluxes. The results showed that the fluxes of  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$  and  $\text{PO}_4\text{-P}$  were higher in the aerobic situation than in the anoxic situation, while that of  $\text{NO}_3\text{-N}$  showed the opposite trend; the fluxes of  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$  and  $\text{NH}_4\text{-N}$  were higher at a higher temperature, but that of  $\text{PO}_4\text{-P}$  was opposite to them.

**Key words:** Muping Marine Ranch of Yantai; nutrient; sediment-water interface; exchange fluxes

营养盐是海洋浮游植物生长繁殖最重要的营养物质, 是水体初级生产力的重要物质基础。溶解无机氮(DIN)或磷酸盐不足时限制浮游植物生

长; 过量的 N、P 则会引起水体富营养化及有害藻华的爆发<sup>[1-2]</sup>, 对海洋生态系统产生不利影响。

沉积物-水界面是营养盐循环、转移、储存的

收稿日期: 2018-12-19, 修订日期: 2019-01-30

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA23050303)

作者简介: 高天赐(1994-) 男, 山东淄博人, 硕士研究生, 主要从事海洋生物地球化学研究, E-mail: tegao@yic.ac.cn.

通讯作者: 高学鲁(1976-) 男, 山东招远人, 博士, 研究员, 主要从事海洋生物地球化学研究, E-mail: xlgao@yic.ac.cn.

重要界面, Boynton 等<sup>[3]</sup>研究表明, 除陆源输入及大气沉降外, 沉积物-水界面的交换是水体营养盐及初级生产力主要补充。掌握沉积物-水界面营养盐的交换通量对于准确估算水体营养盐的收支及迁移转化潜力具有重要意义。沉积物-水界面物质交换通量受到温度、溶解氧(DO)、盐度、pH等多种因素的控制。Cowan 等<sup>[4]</sup>在美国 Mobile 湾、董慧等<sup>[5]</sup>对污染河口区交换通量的研究发现, 改变温度、溶解氧条件营养盐交换通量均发生显著变化。

烟台牟平海洋牧场位于烟台市北部北黄海近海, 属陆架浅海。牟平海洋牧场是我国国家级海洋牧场示范区, 养殖面积约 12.16 km<sup>2</sup>, 主要养殖刺参(*Stichopus aponicus*)、海湾扇贝(*Argopecten irradians*)、梭子蟹(*Portunid*)等水产品<sup>[6]</sup>。邓可等<sup>[7]</sup>研究发现水产养殖会显著影响沉积物-水界面营养盐交换通量, 不同养殖生物的影响效果存在差异。本文研究了2017年11月牟平海洋牧场及其邻近海域沉积物-水界面营养盐的交换通量, 并考察了溶解氧、温度对交换通量的影响, 对于了解目标海域营养盐的迁移转化规律、评估生态环境健康、制定合理的养殖策略具有一定的科学意义和指导价值。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

2017年11月研究人员对牟平海洋牧场及邻近海域进行了一次综合调查。用于本研究的表层沉积物和上覆水样品来自于该航次的6个站, 分别编号为7、9、S4、17、19、S8(图1)。沉积物采用不锈钢抓斗式采泥器采集, 用泥铲收集表层0~2 cm

沉积物于聚乙烯密封袋中置于-20℃冷冻保存; 采用 Niskin 采水器采集对应站位上方底层海水 500 mL, 上覆水立即通过 0.45 μm 醋酸纤维滤膜后-20℃冷冻保存。采用温盐深仪(CTD)测定底层海水的温度、盐度、深度, YSI 多参数分析仪对底层海水 DO 进行测定, 便携式 pH 计测定 pH。

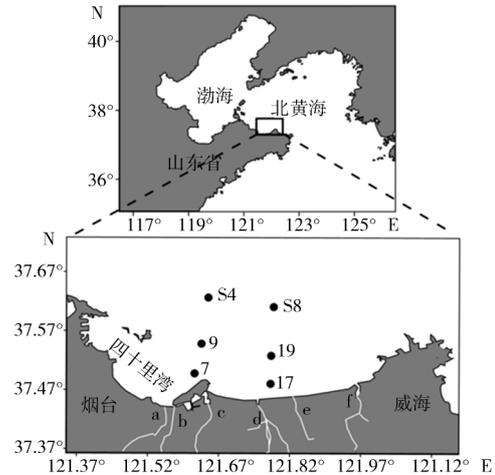


图1 采样站位

Fig. 1 Location of the sampling stations

### 1.2 实验方法

本研究通过实验室模拟培养法获取该海域沉积物-水界面营养盐交换通量, 测定各站位上覆水中营养盐的浓度。配制相应浓度人工海水, 模拟原位条件进行培养实验。各站位上覆水原位水文特征及营养盐浓度见表1。原位培养温度选择平均温度(14.3℃), 各营养盐浓度、盐度、DO与pH通过配制人工海水调节至对应站位原位情况, 通过加入营养盐标准溶液至原位海水浓度, 通过流量计调节泵入空气/N<sub>2</sub>比例控制DO含量, pH通过HCl/NaOH调节。

表1 各站位上覆水基本特征及营养盐浓度

Tab. 1 General characteristics and nutrient concentrations of overlying water at each station

站位	T/℃	S	pH	DO /mg·L <sup>-1</sup>	上覆水各营养盐浓度/μmol·L <sup>-1</sup>			
					NO <sub>2</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	NH <sub>4</sub> -N	PO <sub>4</sub> -P
7	11.5	31.9	8.005	7.51	0.17	4.03	0.51	0.41
9	12.9	32.0	7.982	7.57	0.24	8.90	2.33	0.82
S4	16.2	32.1	7.936	7.52	0.33	7.25	6.19	1.25
17	15.6	31.9	8.000	7.35	0.14	8.03	2.81	1.11
19	13.6	32.1	8.012	7.39	0.15	4.27	1.44	1.13
S8	15.9	32.1	7.998	7.39	0.18	3.72	1.17	1.20

将各站位表层沉积物分别加入到内径 5 cm, 长 35 cm 的有机玻璃管中,向沉积物上方缓慢添加相应人工海水约 450 mL,加水过程避免引起沉积物表面的搅动。另设置只添加等量人工海水培养管为空白。将有机玻璃管放入预先恒温的生化培养箱中进行暗培养。加入人工海水后开始记录时间,装置稳定 4 h 稳定后第 0 h、4 h、8 h、12 h、24 h、36 h、48 h、60 h 对上覆水采样。培养管中部取水样 50 mL,并立即通过 0.45 μm 一次性针头过滤器过滤后于 -20 °C 冷冻保存。取样完成后缓慢添加等量人工海水,保持上覆水整体体积不变。每 24 h 检测上覆水的盐度、温度、pH、DO 等参数是否稳定。

### 1.3 分析方法及计算方法

采用连续流动分析仪(Seal QuAAtro 型)对水样中亚硝态氮( $\text{NO}_2\text{-N}$ )、硝态氮( $\text{NO}_3\text{-N}$ )、铵态氮( $\text{NH}_4\text{-N}$ ),以及磷酸盐( $\text{PO}_4\text{-P}$ )进行测定,其中  $\text{NO}_2\text{-N}$  采用重氮偶氮比色法测定, $\text{NO}_3\text{-N}$  采用铜-镉还原法测定, $\text{NH}_4\text{-N}$  采用次氯酸盐氧化法测定, $\text{PO}_4\text{-P}$  采用磷钼蓝法测定。具体操作步骤参见《海洋监测规范》(GB 17378.4-2007) [8]。

根据上覆水中营养盐浓度随时间的变化速率求解其交换通量,可由该公式计算:

$$J_{\text{DM}} = M(t) / (A \cdot \Delta t)$$

式中:  $J_{\text{DM}}$  表示沉积物和水界面间营养盐的测定通量 [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ];  $A$  表示有机玻璃管的表面积 ( $\text{m}^2$ );  $V$  表示上覆水的体积 ( $\text{m}^3$ );  $M(t)$  为由  $t-1$  时刻到  $t$  时刻营养盐量的变化 ( $\mu\text{mol}$ ),  $M(t) = V [C(t) - D(t-1)]$ ,  $C(t)$  表示  $t$  时刻直接测得沉积物上覆水中营养盐的浓度,  $D(t-1)$  表示  $t-1$  时刻沉积物上覆水中营养盐的实际浓度,  $D(t-1) = [C(t-1)(V - V_0) + C_0 V_0] / V$ , 其中  $V_0$

表 2 模拟原位水体条件下各站位沉积物-水界面营养盐平均交换通量 [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ]

Tab. 2 Average exchange fluxes of nutrients across sediment-water interface under simulated in situ condition in different stations [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ]

站位	$\text{NO}_2\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$	$\text{PO}_4\text{-P}$
7	-7.65 ± 6.91	-303.58 ± 374.88	-348.06 ± 254.56	-51.38 ± 84.02
9	-12.71 ± 23.35	-264.22 ± 382.53	-356.01 ± 383.17	-21.52 ± 190.01
S4	14.63 ± 44.70	34.28 ± 162.90	-222.20 ± 125.79	-45.59 ± 178.32
17	-13.68 ± 15.88	-173.63 ± 186.72	-284.78 ± 226.30	-50.90 ± 14.38
19	14.37 ± 122.83	-263.79 ± 194.03	-227.41 ± 146.36	-45.25 ± 129.67
S8	15.63 ± 18.84	-221.20 ± 163.77	-172.30 ± 127.85	-46.65 ± 228.44

注“-”表示营养盐由上覆水向沉积物释放“+”表示营养盐由沉积物向上覆水释放。下同

为每次取样体积 ( $\text{m}^3$ ),  $C_0$  为人工海水营养盐的原始浓度。负值“-”表示营养盐由上覆水向沉积物迁移,正值“+”表示营养盐由沉积物向上覆水迁移。

当营养盐交换量线性较好时,曲线斜率即为交换通量;当线性效果差时,通常计算平均交换速率 [4]。蒋凤华等 [9] 通过连续函数法计算交换通量,结果较为可靠。但该法繁琐、工作量大,要求培养时间长。本文通过计算营养盐交换量随时间变化的斜率进而得到沉积物-海水界面上营养盐的平均交换速率,剔除前期变化幅度较大的时间段,以获得满意结果。

## 2 结果与讨论

### 2.1 沉积物-水界面营养盐交换通量

#### 2.1.1 实验室模拟培养测定交换通量

模拟现场条件,各站位沉积物-水界面营养盐平均交换通量见表 2。由表 2 可知,在秋季 11 月份沉积物-水界面  $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$  的交换通量分别为 -13.68 ~ 15.63、-303.58 ~ 34.28、-172.30 ~ -356.01、-21.52 ~ -51.38  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。可见不同站位营养盐交换通量存在差异,但除  $\text{NO}_2\text{-N}$  外,大部分营养盐基本表现为相同的迁移方向。不同时间段营养盐的交换通量存在较大差异,实验初期沉积物-水界面体系不稳定,故前期变化幅度较大,后期逐渐减小,某些营养盐的迁移方向也发生了变化。估算得到该海域沉积物-水界面  $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$  的平均交换通量为 ( $1.01 \pm 13.25$ )、( $-181.91 \pm 111.76$ )、( $-268.41 \pm 67.50$ )、( $-45.69 \pm 10.14$ )  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,沉积物整体表现为  $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$  的“汇”,表现为  $\text{NO}_2\text{-N}$  的“源”。

培养实验结果表明,除  $\text{NO}_2\text{-N}$  外,该季节上覆水体中营养盐丰富,故向沉积物中积累。调查海域靠近烟台近岸,陆源输入污染物较多,受沿岸人类活动影响较大。调查站位临近辛安河污水处理厂排污口,烟台市区大部分工业及生活污水经处理后排入该海域,氮氮和总磷的排放量分别达  $2.4 \text{ t/d}$ 、 $0.12 \text{ t/d}$ <sup>[10]</sup>,马兆虎等<sup>[11]</sup>研究发现排污口附近水体  $\text{DIN}$  及  $\text{PO}_4\text{-P}$  浓度分别为  $26.15 \mu\text{mol/L}$ 、 $0.53 \mu\text{mol/L}$ ,排污口附近水质呈轻度富营养水平。另外,秋冬季节浮游生物的生命活动较弱,从水体中吸收利用的营养盐量较春夏季低,水体中营养盐的量较高,由上覆水向沉积物中迁移。

表3 不同海域沉积物-水界面营养盐交换通量的比较

Tab.3 Comparison of exchange fluxes of nutrients across sediment-water interface in different sea areas

研究海域	$\text{NO}_2\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$	$\text{DIN}$	$\text{PO}_4\text{-P}$	献
烟台牟平海洋牧场	-13.68 ~ 15.63	-303.58 ~ 34.28	-172.30 ~ -356.01	-173.29 ~ -659.29	-21.52 ~ -51.38	本文
河北昌黎养殖区	4.08 ~ 44.88	-122.41 ~ 317.76	-228.24 ~ 1884.24	98.88 ~ 2153.28	-18.24 ~ 8.16	[12]
渤海湾天津近岸	-240 ~ 620	1800 ~ 2260	140 ~ 710	1700 ~ 3600	-26 ~ 40	[13]
烟台四十里湾	4.42 ~ 16.8	-371 ~ -394	-206 ~ -303	-572.58 ~ -680.2	-42.8 ~ -46.6	[14]
浙江象山港养殖区	NR	NR	92 ~ 860	NR	-50 ~ 10	[15]
台湾东部黑潮主流经区	1.46	-86.56	63.40	-21.70	-8.12	[16]
东海	-156.4 ~ 14.3	-1054 ~ 0	-736 ~ 2348	-1380 ~ 2354	-105.4 ~ 14.3	[17]
大亚湾养殖区	NR	NR	1089.57	NR	14.45	[18]

注 “NR”表示文献未报道数据

## 2.2 不同环境条件对交换通量的影响

### 2.2.1 溶解氧(DO)对交换通量的影响

通过“充氮气”和“充空气”模拟贫氧( $\text{DO} < 2 \text{ mg/L}$ )和富氧( $\text{DO} > 8 \text{ mg/L}$ )两种DO条件,考察DO对沉积物-水界面营养盐交换通量的影响。原位条件及不同DO条件下交换通量的变化情况见图2。贫氧条件下, $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的交换通量为( $0.21 \pm 15.28$ )、( $-205.87 \pm 59.49$ )、( $-174.54 \pm 40.58$ )、( $36.70 \pm 13.69$ )  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ;富氧条件下, $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的交换通量分别为( $10.78 \pm 19.89$ )、( $-169.37 \pm 101.66$ )、( $-285.74 \pm 60.70$ )、( $-60.23 \pm 33.33$ )  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

改变DO含量对各形态DIN交换通量的影响效果不同。富氧条件下 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的交换通量大于贫氧条件。 $\text{NO}_2\text{-N}$ 是硝化作用和反硝化作用的中间产物,硝化作用和反硝化作用强弱受诸多因素控制,而 $\text{NO}_2\text{-N}$ 在DIN中含量最小,交换通量最小,实验环境较小的扰动即会引起结果较大的变

### 2.1.2 不同海域沉积物-水界面营养盐交换通量的比较

不同海域沉积物-水界面营养盐交换通量的研究结果见表3。从表3中可以看出,牟平海洋牧场营养盐迁移方向和通量与四十里湾相似,这可能与两海域地理位置相处较近有关;台湾东部黑潮主流经区的交换通量普遍低于本研究。而与其他近海海域相比,交换通量的绝对值要明显较小,如昌黎近岸、渤海湾DIN的交换通量平均值约为本研究的2.8倍和4.4倍,大亚湾 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的通量约为本研究的4.1倍。

动,迁移转化最难判定。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 主要由上覆水向沉积物积累,贫氧条件下 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的交换通量大于原位及富氧条件。贫氧条件下沉积物-水界面氧化还原电位低,反硝化作用强烈,硝化作用减弱,沉积物间隙水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 减少,上覆水与沉积物中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度差增大,加速了沉积物从上覆水中吸收 $\text{NO}_3\text{-N}$ 。贫氧条件下 $\text{NH}_4\text{-N}$ 交换通量绝对值小于富氧条件,这与戚晓红等<sup>[17]</sup>的研究结果相似。其原因与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 相反,贫氧条件下反硝化作用强,沉积物中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量高,从而抑制了上覆水向沉积物的迁移。

对于 $\text{PO}_4\text{-P}$ ,富氧条件下交换通量大于原位及贫氧条件,贫氧条件下迁移方向甚至发生改变。沉积物中存在多种形态P,Küster-Heins<sup>[19]</sup>等研究发现,沉积物中铁锰氧化物态磷受氧化还原条件影响,贫氧环境中沉积物-水界面氧分压小,氧化还原电位低,沉积物中部分铁锰氧化物态磷发生解离,转化为 $\text{PO}_4\text{-P}$ ,沉积物间隙水中 $\text{PO}_4\text{-P}$ 含量升高,转为由沉积物向上覆水释放。

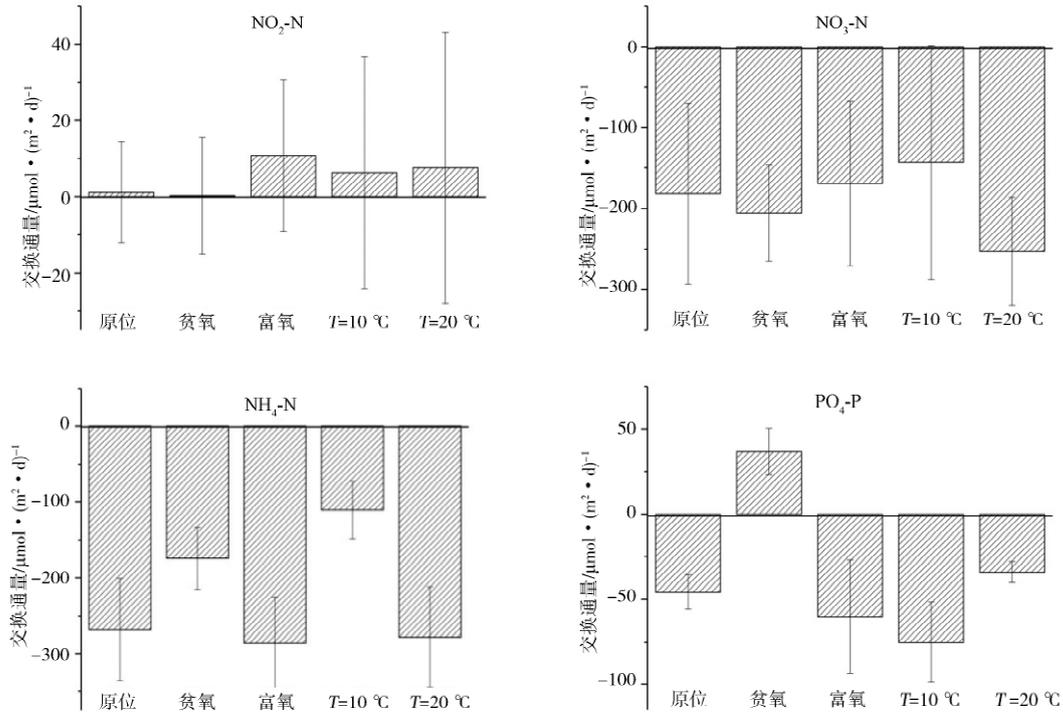


图2 不同培养条件沉积物-水界面营养盐交换通量

Fig. 2 Exchange fluxes of nutrients across sediment-water interface in different incubation conditions

2.2.2 温度对交换通量的影响

通过控制“T = 10 °C”和“T = 20 °C”两个条件,考察温度对沉积物-水界面营养盐交换通量的影响,结果见图2。T = 10 °C时,NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N、PO<sub>4</sub>-P的交换通量值分别为(6.28 ± 30.46)、(-143.20 ± 144.21)、(-110.55 ± 37.72)、(-75.21 ± 23.63) μmol/(m² · d); T = 20 °C时,NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N、PO<sub>4</sub>-P分别为(7.48 ± 35.62)、(-252.82 ± 66.86)、(-278.24 ± 66.43)、(-34.06 ± 6.15) μmol/(m² · d)。

改变温度对各形态DIN交换通量的影响效果基本一致,均表现为温度升高,交换通量增大。一般情况下,温度越高,营养盐分子运动速率越快,其扩散和迁移速率越快。T = 20 °C条件下NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N通量分别约为10 °C时的1.2倍、1.8倍和2.5倍。各形态DIN之间转化主要靠硝化作用和反硝化作用进行,由对应细菌活性控制,硝化作用最适宜的温度为5 °C ~ 45 °C,反硝化作用为25 °C ~ 35 °C<sup>[20]</sup>。低温时硝化细菌和反硝化细菌的微生物活性较低,影响硝化反硝化作用的强度,不利于营养盐的扩散。董慧等<sup>[5]</sup>研究发现,当温度较低时,扩散过程主要依赖于初始浓度差。

T = 10 °C时PO<sub>4</sub>-P交换通量分别为原位条件及20 °C时的1.6倍、2.2倍。即温度越低,PO<sub>4</sub>-P的交换通量越大。温度一方面通过改变分子运动速率进而影响PO<sub>4</sub>-P交换速率;另一方面,Jensen等<sup>[21]</sup>研究发现,沉积物颗粒中金属与P存在吸附-解吸作用,当温度升高时,沉积物颗粒表面与P解吸,间隙水中PO<sub>4</sub>-P浓度增大,从而抑制沉积物对上覆水中PO<sub>4</sub>-P的吸收。本研究中后者影响效果可能较为明显,故表现为升温降低PO<sub>4</sub>-P的扩散速率。

3 结论

(1) 秋季牟平海洋牧场及邻近海域沉积物-水界面NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N、PO<sub>4</sub>-P交换通量分别为-13.68 ~ 15.63、-303.58 ~ 34.28、-172.30 ~ -356.01、-21.52 ~ -51.38 μmol/(m² · d),平均值为1.01、-181.91、-268.41、-45.69 μmol/(m² · d)。沉积物表现为NO<sub>2</sub>-N的“源”,NO<sub>3</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N、PO<sub>4</sub>-P的“汇”。

(2) 溶解氧含量对各营养盐的影响效果不同:对于N,富氧条件下NO<sub>2</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N交换通量大于贫氧条件,NO<sub>3</sub>-N反之;贫氧条件下PO<sub>4</sub>-P交换通量小于富氧条件,且迁移方向发生了改变。

(3) 温度对各形态 DIN 的影响效果一致,均表现为温度越高,交换通量越大;而  $\text{PO}_4\text{-P}$  交换通量可能与磷在沉积物中的结合形态有关,温度越高,金属结合态磷更易解吸,其交换通量越小。

#### 参考文献:

- [1] 宋金明. 中国近海生物地球化学[M]. 济南: 山东科学技术出版社 2004: 1-591.
- [2] 王保栋. 黄海和东海营养盐分布及其对浮游植物的限制[J]. 应用生态学报 2003, 14(7): 1122-1126.
- [3] BOYNTON W R, CEBALLOS M A C, BAILEY E M, et al. Oxygen and nutrient exchanges at the sediment-water interface: a global synthesis and critique of estuarine and coastal data[J]. Estuaries and Coasts 2018, 41(2): 301-333.
- [4] COWAN J L W, PENNOCK J R, BOYNTON W R. Seasonal and interannual patterns of sediment-water nutrient and oxygen fluxes in Mobile Bay, Alabama (USA): regulating factors and ecological significance[J]. Marine Ecology Progress Series, 1996, 141: 229-245.
- [5] 董慧, 郝西来, 张健. 污染河口区沉积物-水界面营养盐交换通量的实验研究[J]. 海洋环境科学 2012, 31(3): 423-428.
- [6] 中华人民共和国农业农村部. 2015—2016年国家级海洋牧场示范区已建名单[R]. 北京: 中华人民共和国农业农村部 2017.
- [7] 邓可. 我国典型近岸海域沉积物-水界面营养盐交换通量及生物扰动的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学 2011: 1-138.
- [8] GB 17378.4-2007 海洋监测规范 第4部分: 海水分析[S].
- [9] 蒋凤华, 王修林, 石晓勇, 等. 胶州湾海底沉积物-海水界面磷酸盐交换速率和通量研究[J]. 海洋科学, 2003, 27(5): 50-54.
- [10] 贾怡然, 孙英兰, 孙长青. 烟台市辛安河污水处理厂排污混合区范围论证[J]. 海洋湖沼通报 2007( S1): 131-136.
- [11] 马兆虎, 王磊, 王东亮, 等. 烟台市辛安河口邻近海域水质评价及分析[J]. 鲁东大学学报: 自然科学版, 2012, 28(4): 364-369.
- [12] 胡博, 谭丽菊, 王江涛. 昌黎近岸海域扇贝养殖区沉积物-水界面溶解无机氮磷及尿素扩散通量研究[J]. 海洋环境科学 2017, 36(6): 864-870.
- [13] MU D, YUAN D K, FENG H, et al. Nutrient fluxes across sediment-water interface in Bohai Bay Coastal Zone, China[J]. Marine Pollution Bulletin 2017, 114(2): 705-714.
- [14] 孙珊, 李佳蕙, 靳洋, 等. 烟台四十里湾海域营养盐和沉积物-水界面交换通量[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(2): 195-200.
- [15] 廖红芳, 郑忠明, REGAN N, 等. 象山港大黄花 *Pseudosciaena crocea* 网箱养殖区沉积物-水界面营养盐通量研究[J]. 海洋学研究 2016, 34(1): 84-92.
- [16] ZHOU F X, GAO X L, ZHANG Y, et al. Potential mobility of inorganic nutrients and its controls at the sediment-water interface in the main path of Kuroshio Current off eastern Taiwan[J]. Marine Pollution Bulletin 2017, 119(1): 270-276.
- [17] 戚晓红, 刘素美, 张经. 东、黄海沉积物-水界面营养盐交换速率的研究[J]. 海洋科学 2006, 30(3): 9-15.
- [18] 程香菊, 郭振仁, 刘国, 等. 大亚湾养殖区沉积物-水界面氮磷的释放通量及其在水体中的扩散迁移[J]. 热带海洋学报 2014, 33(4): 77-84.
- [19] KÜSTER-HEINS K, STEINMETZ E, DE LANGE G J, et al. Phosphorus cycling in marine sediments from the continental margin off Namibia[J]. Marine Geology 2010, 274(1/2/3/4): 95-106.
- [20] RIVETT M O, BUSS S R, MORGAN P, et al. Nitrate attenuation in groundwater: a review of biogeochemical controlling processes[J]. Water Research 2008, 42(16): 4215-4232.
- [21] JENSEN H S, MORTENSEN P B, ANDERSEN F O, et al. Phosphorus cycling in a coastal marine sediment, Aarhus Bay, Denmark[J]. Limnology and Oceanography, 1995, 40(5): 908-917.