

# 胶州湾沉积物-海水界面溶解无机氮的迁移特征及其影响因素解析

汪雅露<sup>1,2,3</sup>, 袁华茂<sup>1,2,3</sup>, 宋金明<sup>1,2,3</sup>, 李学刚<sup>1,2,3</sup>, 李 宁<sup>1,2,3</sup>, 曲宝晓<sup>1,3</sup>,  
康绪明<sup>1,3</sup>, 王启栋<sup>1,2,3</sup>, 邢建伟<sup>1,2,3</sup>, 梁宪萌<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院 海洋生态与环境重点实验室, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院大学, 北京 100039; 3. 青岛海洋国家实验室海洋生态与环境功能实验室, 山东 青岛 266071)

**摘要:** 采用实验室培养法, 在原位温度和溶氧条件下, 研究了夏、冬季胶州湾沉积物-海水界面溶解无机氮(DIN)的迁移特征。结果表明, 夏、冬季胶州湾沉积物-海水界面 DIN 主要以 NO<sub>3</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 的形态进行交换, 夏季胶州湾沉积物表现为水体 DIN 的源, 其交换通量为 1.64×10<sup>9</sup> mmol/d, 可以提供维持初级生产力所需氮的 39.3%; 而冬季沉积物表现为 DIN 的汇, 其交换通量为-2.12×10<sup>8</sup> mmol/d。利用相关分析和主成分回归分析, 研究界面不同形态 DIN 交换速率和底层环境因子的关系, 结果表明, 夏季胶州湾沉积物-海水界面 DIN 的交换主要受沉积物中有机质的矿化、底栖藻类的同化作用和扩散过程共同调控, 而冬季则主要受内源有机质的矿化、底栖藻类的同化作用、吸附-解吸和扩散过程共同调控。

**关键词:** 胶州湾; 沉积物-海水界面; 溶解无机氮; 交换速率; 环境因素

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2017)03-0102-11

DOI: 10.11759/hyxx20160515001

氮是浮游植物生长繁殖必需的营养元素, 其生物地球化学循环是海洋学研究的重要内容<sup>[1-2]</sup>。沉积物是水体溶解无机氮(DIN)的重要来源<sup>[3-5]</sup>, 在 Mobile 河口, 沉积物释放的 DIN 可提供维持初级生产力所需氮的 36%<sup>[3]</sup>, 王修林等<sup>[4]</sup>的研究表明, 渤海沉积物释放的 DIN 占浮游植物生长所需的 22%, 因此, 研究沉积物-海水界面无机氮的迁移转化对评价海洋中的氮循环具有重要意义。自然界中, 溶解无机氮以铵态氮(NH<sub>4</sub>-N)、硝态氮(NO<sub>3</sub>-N)和亚硝态氮(NO<sub>2</sub>-N)三种形态存在, 不同形态无机氮之间可以相互转化。NH<sub>4</sub>-N 是有机氮矿化的主要产物<sup>[6]</sup>, 其交换速率主要由扩散过程决定<sup>[7]</sup>。NO<sub>3</sub>-N 和 NO<sub>2</sub>-N 的交换主要受硝化-反硝化作用影响, 因此硝化细菌和反硝化细菌的丰度以及溶氧含量也是影响界面氮交换的重要环境因子<sup>[8]</sup>。另外, 底层温度、盐度、沉积物特性(平均粒径、孔隙率)、有机质含量、叶绿素 a(Chl a)、碳氮比(C/N)及底栖生物活动也会影响沉积物-海水界面无机氮的交换<sup>[9-14]</sup>。总之, 沉积物-海水界面 DIN 的交换受生物、化学和物理因素共同调控, 而简单的相关分析并不能系统阐述环境因子对沉积物-海水界面溶解无机氮迁移转化的影响。

近几十年来由于人类活动, 胶州湾水体内的营

养盐丰度和结构都发生了较为明显的变化。沈志良<sup>[15]</sup>的研究表明, 从 1962 年到 1998 年胶州湾水体中的 DIN 的浓度增加了 3.9 倍, 导致富营养化的风险增大。目前, 针对胶州湾沉积物-海水界面 DIN 迁移转化的研究较少, 而已有的研究并未保证培养条件接近原位条件, 其调查结果可能存在一定偏差。另外, 前人对其影响因素进行解析时往往忽略了生物因素<sup>[16]</sup>, 并不能系统全面的阐述环境因子对沉积物-海水界面无机氮交换的影响。本研究在原位温度和溶氧条件下进行室内培养实验, 以斜率法获得原位交换速率,

收稿日期: 2016-05-15; 修回日期: 2016-07-30

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目课题(2015CB452902、2015CB452901); 国家基金委-山东省联合基金项目(U1606404); 青岛国家海洋实验室"鳌山人才"卓越科学家专项项目资助(2015ASTP-OS13)

[Foundation: National Key Basic Research Program of China(973 Program), No.2015CB452902, No.2015CB452901; Joint Fund of National Natural Science Foundation and Shandong Province for Marine Science Research Centers, No.U1406403; Aoshan Talents program supported by Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, No.2015ASTP-OS13.]

作者简介: 汪雅露(1991-), 女, 湖北仙桃人, 硕士研究生, 主要从事环境工程研究, Email: wangyalu2013@163.com; 袁华茂, 通信作者, 研究员, 硕士生导师, 主要从事海洋生物地球化学循环研究, Email: yuanhuamao@qdio.ac.cn; 宋金明, 通信作者, 研究员, 博士生导师, 主要从事海洋生物地球化学循环研究, Email: jmsong@qdio.ac.cn

同时,测定了表层沉积物中总有机碳(TOC)、Chl *a*、C/N、总氮(TN)、含水率( $\phi$ )、黏土含量、中值粒径( $D_{50}$ )以及间隙水和底层水体中不同形态 DIN 的浓度,利用相关分析和主成分回归分析探讨了底层环境因子对沉积物-海水界面间溶解无机氮交换的影响,以期更为系统的探讨影响胶州湾沉积物-海水界面溶解无机氮交换的关键因素,为进一步研究氮的生物地球化学循环提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 样品采集

在胶州湾预设 10 个采样站位,分别于 2015 年 7 月和 2016 年 1 月乘“创新号”调查船,用箱式采样器采集高度为 10~15 cm 表层未扰动的柱状沉积样和表层沉积物(0~1 cm),具体站位见图 1。夏季采集了全部站位的表层沉积样和湾内 8 个站位的柱状样,冬季采集了湾内和湾口共 9 个站位的柱状样和表层沉积物样。将柱状沉积样置于有机玻璃管( $D_{内}=16$  cm)中,4℃避光保存。同时,将表层沉积物分为 3 份,其中 1 份-20℃冷冻保存,用于测定 Chl *a*、TOC 和 TN。另外两份避光冷藏保存,带回实验室,1 份离心(4 500 r/min, 10 min, 4℃)后用 0.45  $\mu$ m 醋酸纤维膜过滤取间隙水,另一份待测含水率、黏土含量和  $D_{50}$ 。取同站位底层海水 10 L,4℃避光保存,8 h 内带回实验室进行培养实验。

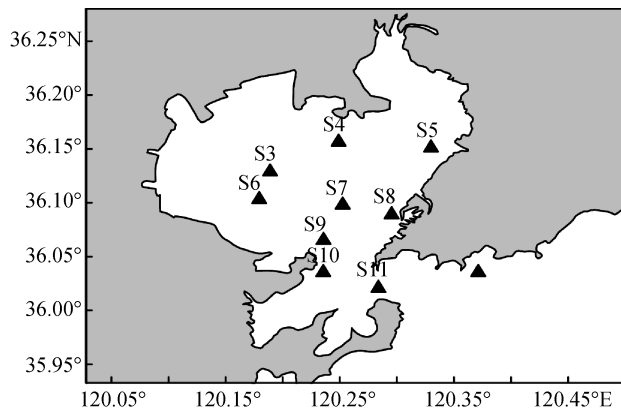


图 1 胶州湾采样站位图  
Fig. 1 Sampling stations in Jiaozhou Bay

### 1.2 室内培养实验

夏、冬季现场测定的底层水温空间差异均较小(表 1),因此控制培养温度接近底层水体的平均温度,夏季为 24.5℃,冬季为 5.0℃。培养开始前,将沉积

柱与底层海水均置于预先恒温的培养箱中,底层海水温度达到培养温度时,向沉积柱中缓慢加入 4 L 底层海水,避光培养,另取一有机玻璃管加入等量底层海水作为对照组。向上覆水中通入经预实验确定的一定流量的空气或空气与氮气的混合气,使培养水体的溶解氧浓度接近各站原位溶解氧条件。实验过程中,以 24 h 为间隔用 Thermo Scientific Orion™ Versa Star™ pH/ISE/电导率/溶解氧多参数台式测量仪对上覆水体的盐度、DO 和 pH 进行监测,培养条件如表 1 所示。电极法条件下测定的 DO 值经碘量法校正( $r^2=0.99$ )。

培养稳定 6 h 后开始采集水样,将第一次采样时刻作为起始点,培养 3~4 d,每隔 10~24 h 取样,每次取样 40 mL,用 0.45  $\mu$ m 醋酸纤维膜过滤后,加氯仿-20℃保存。取完水样后加入原站位采集的等体积底层海水,保证培养过程中上覆水体积不变,依据公式(1)、(2)计算沉积物-海水界面  $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$  和  $\text{NH}_4\text{-N}$  的交换量和交换速率:

$$M_i = V \times C_i + \Delta V_{取} \times (C_{i-1} - C_0) - V \times C_0 \quad (1)$$

$$F = 24 \times (dM/dt) / A \quad (2)$$

式中:  $M_i$ ,  $t_i$  时间内沉积物-海水界面营养盐的交换量( $\mu\text{mol}$ );  $\Delta V_{取}$ , 取样体积(L);  $V$ , 培养过程中上覆水体积(L);  $C_0$ , 底层海水  $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NO}_2\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$  的浓度( $\mu\text{mol/L}$ );  $C_{i-1}$ ,  $t_{i-1}$  时刻实验组上覆水营养盐的浓度;  $F$ , 沉积物-海水界面营养盐的交换速率( $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ );  $dM/dt$ , 交换量随时间变化的斜率( $\mu\text{mol/h}$ );  $A$ , 交换面积,即  $\pi(D_{内}/2)^2 = 0.02 \text{ m}^2$ 。

### 1.3 底层参数测定

#### 1.3.1 水体参数测定

用 CTD 现场测定底层水体的温度和盐度, pH 由 Thermo Orion 5-star pH 计配置雷磁 E-201-D 复合电极测定,底层水体的 DO 利用碘量滴定法(GB 12763.4-2007-T)测定。采集的底层水、间隙水和培养水样用 0.45  $\mu$ m 醋酸纤维膜过滤后用 Quattro39 型营养盐流动分析仪测定  $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$  和  $\text{NH}_4\text{-N}$  浓度。

#### 1.3.2 表层沉积物参数测定

表层沉积物的含水率( $\phi$ )用重量法测定,沉积物中的 Chl *a* 参照 Parsons 等<sup>[17]</sup>的方法用 N, N-二甲基酰胺<sup>[18]</sup>萃取后用同步荧光法<sup>[19]</sup>测定,表层沉积物经 HCl 处理去无机碳(GB 17378.5-2007)后用 vario Macro cube 型元素分析仪测定 TOC 含量,表层沉积物的粒径分布用 Malvern 激光衍射粒度仪分析,沉积物 TN 用 vario Macro cube 型元素分析仪测定。

表 1 实验室培养条件与底层水原位环境条件

Tab. 1 Water temperature, DO, salinity, and pH in incubation experiment and in situ bottom water

站位	温度(°C)		溶氧(mg/L)		盐度		pH			
	原位条件	培养条件	原位条件	培养条件	原位条件	培养条件	原位条件	培养条件		
夏季	S3	25.8	24.5±0.5	6.63	6.72±0.07	30.9	31.1	7.85	7.81	
	S4	24.6	24.5±0.5	5.56	5.52±0.10	30.8	31.0	7.84	7.84	
	S5	24.7	24.5±0.5	5.96	5.99±0.17	30.9	31.1	7.86	7.87	
	S6	25.2	24.5±0.5	6.23	6.01±0.17	31.0	31.0	7.78	7.71	
	S7	23.2	24.5±0.5	6.99	7.10±0.10	31.0	31.2	7.91	7.93	
	S8	23.7	24.5±0.5	6.65	6.63±0.15	31.0	31.1	7.91	7.87	
	S9	24.5	24.5±0.5	6.63	6.69±0.13	31.1	31.2	7.87	7.84	
	S10	24.7	24.5±0.5	6.85	7.05±0.20	31.0	31.1	7.88	7.87	
	冬季	S3	3.6	5.0±0.5	12.4	11.53±0.07	30.7	30.9	7.64	7.61
		S4	4.9	5.0±0.5	10.94	11.46±0.10	30.8	31.0	7.53	7.50
S5		4.4	5.0±0.5	11.19	11.64±0.17	30.3	30.5	7.51	7.50	
S6		4.0	5.0±0.5	12.14	12.03±0.17	30.8	31.1	7.62	7.63	
S7		5.5	5.0±0.5	10.26	12.04±0.10	31.1	31.0	7.53	7.56	
S8		4.2	5.0±0.5	10.37	11.01±0.15	30.9	30.9	7.42	7.42	
S9		6.9	5.0±0.5	10.21	10.06±0.13	31.1	31.4	7.60	7.59	
S10		7.6	5.0±0.5	9.37	10.49±0.20	31.0	31.5	7.42	7.45	
S11		7.0	5.0±0.5	9.95	11.18±0.07	31.1	31.2	7.61	7.63	

## 2 结果与讨论

### 2.1 胶州湾沉积物-海水界面溶解无机氮的交换速率

NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 交换量随培养时间的变化曲线具有相似特征,其典型动力学曲线如图 2。由于培养实验开始前,沉积柱与底层海水分开保存,培养条件与实验条件存在一定差异,实验初始阶段曲线可能会出现波动,因此取稳定后的线性部分进行计算<sup>[20]</sup>。

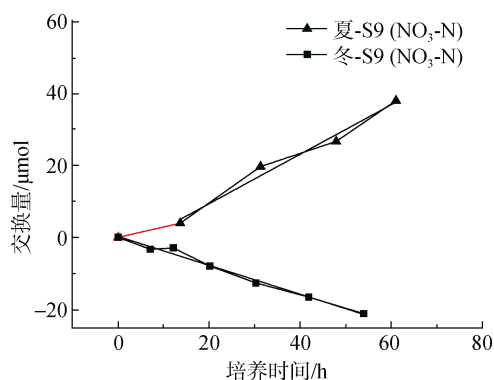


图 2 上覆水体与沉积物界面交换量随培养时间的变化  
Fig. 2 Exchange amount at sediment-water interface versus incubation time

将 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 交换量随时间变化曲线的线性部分斜率代入公式(2),可以求得各形态溶解无机氮在胶州湾沉积物-海水界面的交换速率。如表 2 所示,夏季胶州湾沉积物主要表现为 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 的源,其交换速率分别为-714~1 560、-41~941 和 112~26 064 μmol/(m<sup>2</sup>·d),其中大部分站位 NH<sub>4</sub>-N 的交换速率在 112~2 118 μmol/(m<sup>2</sup>·d)范围内,与蒋凤华等<sup>[16]</sup>的结果较为接近。S5 站位出现了 NO<sub>3</sub>-N 交换速率的最低值和 NH<sub>4</sub>-N 交换速率的最高值,这可能是由于 S5 站位靠近李村河口,沉积物中有机质含量较高(表 4),底层生物活动活跃,耗氧率高,有机质的矿化作用和以 NO<sub>3</sub>-N 为底物的反硝化作用较为显著。冬季沉积物基本表现为 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 的汇,其交换速率分别为-657~637、-117~20 和 -1 334~463 μmol/(m<sup>2</sup>·d)。目前,针对冬季胶州湾沉积物-海水界面营养盐的交换速率还未见报道,本研究为进一步完善胶州湾营养盐的收支模型提供了数据基础。

表 3 为中国近海不同海域沉积物-海水界面 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 的交换速率,比较中国近岸海域不同形态溶解无机氮的交换速率,可以发现 NO<sub>2</sub>-N 的交换速率均明显低于 NO<sub>3</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N,这与本文的研究结果一致。此外,黄河口湿地沉积物-海水界面 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 的交换速率明显

表 2 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 在胶州湾不同站位沉积物-海水界面间的交换速率(μmol/(m<sup>2</sup>·d))

Tab. 2 Exchange rates of NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, and NH<sub>4</sub>-N at sediment-water interface in different stations in Jiaozhou Bay(μmol/(m<sup>2</sup>·d))

站位	夏季			冬季		
	NO <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>	NH <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>	NH <sub>4</sub>
S3	652	26	655	-154	-35	332
S4	1 560	48	1 188	-657	-117	57
S5	-715	-41	26 064	-213	-59	-1 064
S6	1 412	167	623	-201	-20	463
S7	768	19	112	281	-40	-1 334
S8	1 080	-35	674	107	-51	-580
S9	824	941	2 118	-481	-81	-926
S10	853	676	1 737	-523	-74	-397
S11	NA	NA	NA	637	-61	-745

注: .NA 表示此站位未进行培养实验

表 3 中国近海不同海域沉积物-海水界面 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 的交换速率

Tab. 3 Exchange rates of NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, and NH<sub>4</sub>-N at sediment-water interface in different inshore areas of China

调查海域	研究方法	沉积物-海水界面交换速率(μmol/(m <sup>2</sup> ·d))			参考文献
		NO <sub>2</sub>	NO <sub>3</sub>	NH <sub>4</sub>	
胶州湾	实验室培养法	-117~941	-714~1 560	-1 334~26 064	本文
东海	现场培养法	-156~27	-6 632~132	-927~2 347	[11]
胶州湾	实验室培养法	5~670	-2 000~2 800	-500~1 600	[16]
桑沟湾养殖海区	扩散法	641	3 302	37 633	[21]
浙江近海(赤潮前)	现场培养法	-30~-20	-1 330~-680	-650~1 690	[22]
浙江近海(赤潮后)	现场培养法	-110~50	50~820	-450~980	[22]
渤海	船基沉积物培养法	65	614	628	[4]
黄河口湿地	实验室培养法	-1 200~2 100	-22 800~144 000	-9 160~6 940	[23]

较高,这可能是因为湿地具有较高的生产力和生物量,从而使界面营养盐的循环更迅速。

## 2.2 影响沉积物-海水界面无机氮交换的环境相关因子解析

沉积物-海水界面 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 的交换主要由微生物的降解作用、硝化-反硝化、吸附-解吸和扩散过程控制,受多种环境因子共同制约。这些环境因子之间相互影响,关系复杂,根据性质的差异可以将其分为以下三类进行讨论:(1)与扩散过程相关的参数:沉积物间隙水中 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 的浓度以及底层水体中 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 的浓度;(2)与表层生物活动相关的参数:表层沉积物 Chl *a*、TOC、TN 和 C/N;(3)与沉积物本身性质相关的参数:表层沉积物的黏土含量、D<sub>50</sub> 和含水率。

表 4、表 5 列出了不同站位的底层环境参数,从表 4 中可以看出,表层沉积物的 Chl *a* 为 0.05~4.62 μg/g,

TOC 在 0.25%~0.95%, TN 含量为 0.012%~0.085%, C/N 为 9.50~62.71,黏土含量为 7%~30%, D<sub>50</sub> 为 9~500 μm,含水率为 20.77%~51.00%,底层海水的 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 浓度分别为 0.49~41.9 μmol/L、0.04~2.40 μmol/L 和 1.04~27.6 μmol/L,间隙水中 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 的浓度分别为 4.66~46.5 μmol/L、0.20~2.20 μmol/L 和 26.6~580 μmol/L。

### 2.2.1 底层水体和沉积物间隙水中 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 浓度及二者间浓度差

夏季胶州湾底层 NO<sub>3</sub>-N 的交换速率与间隙水中 NO<sub>3</sub>-N 浓度存在较弱正相关关系(表 6),从图 3 可以看出间隙水中 NO<sub>3</sub>-N 浓度越高,沉积物中 NO<sub>3</sub>-N 越容易向水体迁移,这符合扩散原理,这表明底层 NO<sub>3</sub>-N 交换受扩散过程调控。冬季 NO<sub>3</sub>-N 在沉积物-海水界面的交换速率与底层 NO<sub>3</sub>-N 浓度、间隙水 NO<sub>3</sub>-N 浓度和底层浓度差几乎不存在相关关系,因此扩散过程可能并不是调控冬季胶州湾沉积物-海水界面 NO<sub>3</sub>-N 交换的主要过程。

表 4 不同站位表层泥的环境参数

Tab. 4 Environmental factors of surface mud at different stations

	站位	Chl <i>a</i> (μg/g)	TOC(%)	TN(%)	C/N	黏土含量(%)	<i>D</i> <sub>50</sub> (μm)	含水率(%)	
夏季	S3	1.22	0.30	0.018	16.42	13	53	32.97	
	S4	1.36	0.45	0.036	12.67	23	18	36.33	
	S5	4.62	0.95	0.085	11.14	26	9	51.00	
	S6	1.63	0.50	0.031	16.03	26	11	39.52	
	S7	1.39	0.54	0.042	12.99	27	11	33.96	
	S8	2.48	0.59	0.053	11.17	14	85	35.15	
	S9	0.59	0.37	0.028	13.22	16	45	28.88	
	S10	1.13	0.34	0.026	13.09	17	28	34.79	
	S11	0.05	0.25	0.012	21.39	7	500	25.72	
	S12	1.20	0.45	0.035	12.77	17	28	39.33	
	冬季	S3	2.12	0.30	0.032	9.50	13	53	31.22
		S4	1.15	0.49	0.049	9.96	25	14	36.93
S5		2.24	0.87	0.085	10.28	30	9	48.15	
S6		2.9	0.53	0.047	11.39	26	11	37.39	
S7		0.79	0.52	0.040	12.9	29	10	36.21	
S8		1.08	0.59	0.041	14.51	26	13	36.69	
S9		0.23	0.98	0.016	62.71	NA	NA	20.77	
S10		0.71	0.37	0.029	12.64	17	25	33.03	
S11		0.27	0.45	0.046	9.78	21	16	33.47	

注: NA 表示该站位未测定此参数

表 5 不同站位底层海水和间隙水中 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 的浓度

Tab. 5 Pore-water concentration and bottom-water concentration of NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, and NH<sub>4</sub>-N at different stations

站位	底层营养盐浓度(μmol/L)			间隙水营养盐浓度(μmol/L)				
	NO <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>	NH <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>	NH <sub>4</sub>		
夏季	S3	6.69	0.53	3.64	11.7	0.36	207	
	S4	8.22	0.64	6.44	19.9	2.20	204	
	S5	8.86	0.59	7.11	5.74	0.20	260	
	S6	7.03	0.66	6.19	9.94	0.73	145	
	S7	2.11	0.19	2.68	4.66	0.31	237	
	S8	4.11	0.26	4.36	7.97	0.27	555	
	S9	1.19	0.15	1.99	5.69	0.22	206	
	S10	1.72	0.16	2.46	8.04	0.39	333	
	S11	0.67	0.04	1.43	6.24	1.35	73.3	
	S12	0.49	0.15	1.38	5.37	0.41	309	
	冬季	S3	22.5	1.83	1.04	10.38	0.42	56.5
		S4	20.3	1.37	4.99	8.34	0.36	63.5
S5		41.9	2.40	27.6	10.2	0.51	174	
S6		22.6	1.80	1.30	8.96	0.44	57.7	
S7		5.96	0.62	2.19	8.75	0.29	140	
S8		17.2	0.98	8.11	12.2	0.60	105	
S9		9.00	1.00	2.15	46.5	0.43	26.6	
S10		7.56	0.89	2.17	8.39	0.25	56.1	
S11		6.34	0.83	1.54	7.59	0.54	580	

表 6 沉积物-海水界面  $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$  和  $\text{NH}_4\text{-N}$  的交换速率与底层环境参数的相关性分析

Tab. 6 Correlation analysis between exchange rates at sediment-water interface and benthic environmental factors

环境参数	Chl <i>a</i>	TOC	TN	C/N	黏土含量	$D_{50}$	含水率	底层水体浓度	间隙水中浓度	底层浓度差
$\text{NO}_3\text{-N}$ 交换速率	0.34	0.42	0.38	-0.11	0.48	-0.30	0.71 <sup>c</sup>	0.65	0.68 <sup>c</sup>	0.50
夏季 $\text{NO}_2\text{-N}$ 交换速率	-0.55	-0.50	-0.41	0.07	-0.34	0.05	0.51	-0.58	-0.21	-0.02
$\text{NH}_4\text{-N}$ 交换速率	-0.57	-0.16	-0.26	-0.19	-0.41	0.09	-0.50	-0.34	-0.06	-0.05
冬季 $\text{NO}_3\text{-N}$ 交换速率	-0.19	-0.20	0.17	-0.30	0.12	-0.15	0.14	-0.27	-0.31	-0.04
$\text{NO}_2\text{-N}$ 交换速率	0.53	-0.01	0.04	-0.26	-0.04	-0.17	0.17	0.19	0.21	-0.16
$\text{NH}_4\text{-N}$ 交换速率	0.57	-0.54	-0.13	-0.30	-0.53	0.49	-0.06	-0.37	-0.32	-0.30

注: <sup>c</sup>.  $P$  在 0.05-0.10 之间; 底层水体浓度、间隙水中浓度和底层浓度差分别代表各形态氮各自对应交换速率的浓度或浓度差

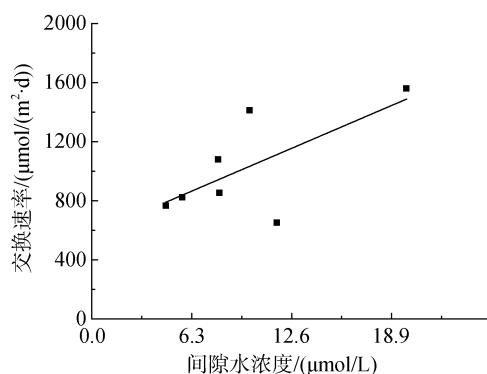


图 3 夏季  $\text{NO}_3\text{-N}$  在沉积物-海水界面的交换速率与间隙水中  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度的关系

Fig. 3 Simple linear regression plot of  $\text{NO}_3\text{-N}$  pore water concentration versus exchange rates of  $\text{NO}_3\text{-N}$  in summer.

夏、冬季沉积物-海水界面  $\text{NO}_2\text{-N}$  和  $\text{NH}_4\text{-N}$  的交换速率与其底层浓度、间隙水浓度及底层浓度差之间均不存在明显相关关系, 这说明扩散并不是调控其迁移转化的主要过程, 这与石峰针对东海的研究结果一致<sup>[11]</sup>。

### 2.2.2 表层沉积物的 TOC、Chl *a*、TN 和 C/N

夏季胶州湾表层沉积物中 TOC 与 Chl *a* 耦合密切( $r=0.95$ ,  $P<0.001$ ,  $N=10$ ), 这表明沉积物中有机质含量越高, 底栖微藻的丰度越高。针对 Mobile 海湾的研究表明, 营养盐交换速率的最大值一般发生在富含有机质的沉积物中<sup>[3]</sup>, 一般而言, 沉积物中有机质矿化能使间隙水中营养盐浓度升高, 从而促进沉积物中营养盐向水体释放。然而, 有机质丰富的沉积物中, 底栖微藻丰度较高, 其同化作用会掩盖沉积物中无机氮的释放量<sup>[24]</sup>, 因此在探究夏季胶州湾沉积物-海水界面营养盐的交换时, 需要协同考虑有机质的矿化作用和底栖藻类的同化作用。由表 6 可知, 夏、冬季胶州湾沉积物-海水界面  $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$  和

$\text{NH}_4\text{-N}$  的交换速率与表层沉积物的 TOC 和 Chl *a* 均不存在明显的相关关系, 这表明底层有机质和藻类丰度对界面无机氮交换的影响较小, 这可能是因为有机质的矿化作用和底栖藻类的同化作用相抵, 因此与沉积物-海水界面  $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$  和  $\text{NH}_4\text{-N}$  交换的关系并不明确。

从图 4 可以看出, 在冬季, 随着表层沉积物中 Chl *a* 的增多, 沉积物-海水界面  $\text{NO}_2\text{-N}$  和  $\text{NH}_4\text{-N}$  的释放速率基本呈增大趋势。结合相关分析(表 5)可知, 随着表层沉积物中 Chl *a* 含量的升高, 沉积物中 C/N 呈降低趋势, 这可能是因为沉积物中 Chl *a* 含量越高, 海洋内源有机质含量越高, 有机质的活性越强, 沉积物中有机氮更容易被矿化生成  $\text{NH}_4\text{-N}$  并向上层水体扩散, 因此底层  $\text{NH}_4\text{-N}$  交换速率呈上升趋势。随着表层沉积物 Chl *a* 含量的增加, 冬季底层  $\text{NO}_2\text{-N}$  的交换速率也呈增大的趋势, 考虑到  $\text{NH}_4\text{-N}$  和  $\text{NO}_2\text{-N}$  分别是硝化作用的底物和中间产物, 因此冬季  $\text{NO}_2\text{-N}$  的交换速率可能主要受硝化作用调控。

一般而言, 沉积物中 TN 含量越高, 沉积物中可交换态无机氮的含量越高<sup>[25]</sup>, 因此沉积物中 TN 含量也是影响底层无机氮交换的重要环境因子。然而, 夏、冬季沉积物-海水界面  $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$  和  $\text{NH}_4\text{-N}$  的交换速率与沉积物中 TN 均不存在显著相关关系(表 6), 这表明表层沉积物中 TN 可能不是影响胶州湾沉积物-海水界面  $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$  和  $\text{NH}_4\text{-N}$  交换的主要因子。

C/N 能表征有机质活性, 是影响底层无机氮迁移转化的重要环境因子。Hammond 等<sup>[26]</sup>的研究表明, 富氮有机质更容易被微生物降解, 因此 C/N 较低的沉积物中有机氮更容易被转化为无机氮, 并进一步向水体释放, Hall 等<sup>[27]</sup>对斯卡格拉克海峡的调查也表明低 C/N 的沉积物更容易向水体释放  $\text{NO}_3\text{-N}$ 。本

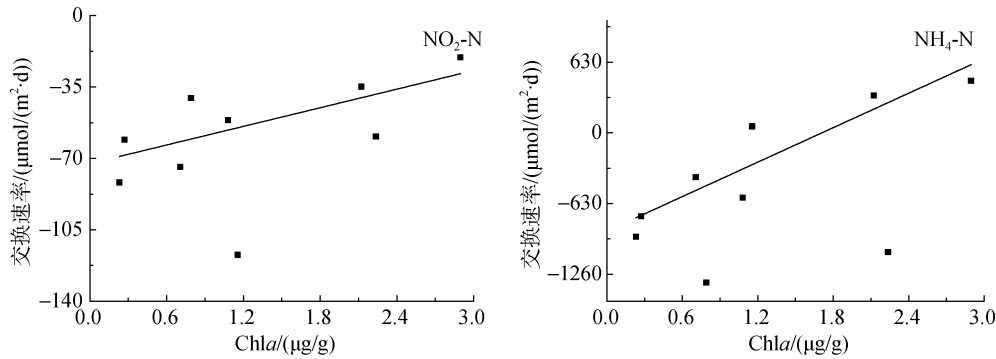


图 4 冬季 NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 在沉积物-海水界面的交换速率与表层沉积物 Chl *a* 含量的关系

Fig. 4 Simple linear regression plot of surficial sediment Chl *a* versus exchange rates of NO<sub>2</sub>-N (left) and NH<sub>4</sub>-N (right) in winter.

实验中,夏、冬季沉积物-海水界面 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 的交换速率与表层沉积物的 C/N 均不存在明显相关关系,然而,比较不同站位沉积物-海水界面 NH<sub>4</sub>-N 的交换速率,可以看出夏季 NH<sub>4</sub>-N 的最大释放速率发生在 S5 站位,其沉积物的 C/N 最低,这证实富氮有机质更易被矿化,与 Hammond 等<sup>[26]</sup>的结论一致。而夏季 NO<sub>3</sub>-N 和 NO<sub>2</sub>-N 的最大吸收速率也发生在 C/N 最低的沉积物中,这与 Hall 等<sup>[27]</sup>的结论相悖,这可能是由于 S5 站位有机质含量较高,底层生物活动较为活跃,耗氧率高,沉积物处于还原状态,此时以 NO<sub>3</sub>-N 作为电子受体的反硝化作用占主导,反硝化作用会将 NO<sub>3</sub>-N 转化为 N<sub>2</sub>-N,使间隙水中 NO<sub>3</sub>-N 处于较低浓度,从而促进水体中 NO<sub>3</sub>-N 向沉积物迁移。冬季 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 的交换速率与表层沉积物 C/N 也不存在明显的相关关系,这表明沉积物的 C/N 对胶州湾底层无机氮循环影响很小。

### 2.2.3 表层沉积物特性

#### 2.2.3.1 含水率

图 5 表现了夏季胶州湾沉积物-海水界面 NO<sub>3</sub>-N 的交换速率与沉积物的含水率的关系,从图中可以看出,沉积物的含水率越大,夏季底层界面 NO<sub>3</sub>-N 的交换越迅速,两者存在一定正相关关系(表 6)。沉积物与间隙水之间的交换发生在固液界面,因此含水率在一定程度上表征了溶解和扩散过程的难易程度,而随着胶州湾表层沉积物含水率的增加,沉积物-海水界面 NO<sub>3</sub>-N 的交换速率呈上升趋势,与沉积物-海水界面营养盐通量主要受含水率(孔隙率)影响的结论一致<sup>[16]</sup>,表明夏季沉积物-海水界面 NO<sub>3</sub>-N 的交换受溶解和扩散过程控制。夏季 NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 的交换速率与表层沉积物中含水率均不存在明显的相关关系(表 6),这进一步证实夏季胶州湾沉积物-海

水界面 NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 的交换受扩散过程影响较小。由相关分析可知,冬季沉积物-海水界面 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 的交换速率与含水率均不存在明显相关关系,由此可推知,温度较低时,扩散和溶解等物理过程对冬季胶州湾底层无机氮循环的影响并不显著。

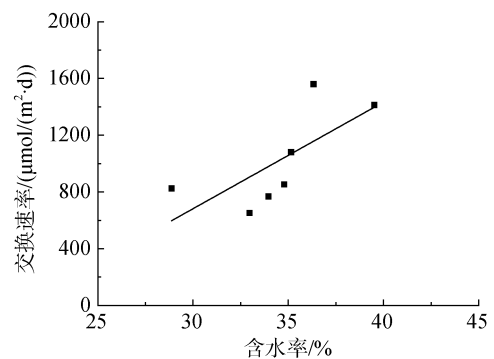


图 5 夏季 NO<sub>3</sub>-N 在沉积物-海水界面的交换速率与表层沉积物含水率的关系

Fig. 5 Simple linear regression plot of surficial sediment water ratio versus exchange rates of NO<sub>3</sub>-N in summer.

#### 2.2.3.2 黏土含量与 D<sub>50</sub>

黏土矿物粒径小,比表面积较大,是吸附-解吸和溶解等物理过程发生的重要场所,而 D<sub>50</sub>能表征沉积物的平均粒径,因此黏土含量和 D<sub>50</sub>是影响吸附-解吸和扩散过程的重要环境因子。由表 6 可知,夏、冬季沉积物-海水界面 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 的交换速率与表层沉积物的黏土含量和 D<sub>50</sub>之间均不存在明显的相关关系,这表明沉积物粒径分布对夏季底层 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 交换的影响较小。

### 2.2.4 基于主成分回归分析的影响因素分析

如前所述,沉积物-海水界面 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 的交换受多种环境因子影响,而这些影响因

子之间相互关联,简单的相关性分析和多元线性回归模型将环境因子看作独立变量,并不能科学的量化各个环境因子的影响。在数理统计中,主成分回归分析能对多因素影响下的研究对象进行合理预测和归因<sup>[28-31]</sup>,在保留大部分信息的同时,考虑了环境因子之间的相关性,能较为系统的阐述环境因子对沉积物-海水界面无机氮交换的影响。此次研究通过主成分回归分析量化了环境因子对沉积物-海水界面 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 交换速率的影响,以此探究影响胶州湾沉积物-海水界面 DIN 交换的关键因子。

将所有数据进行 Z 标准化去量纲,利用 SPSS Statistic 19 分别对夏季和冬季沉积物-海水界面 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 的交换速率与相关环境因子进行主成分回归分析,能较为合理的模拟沉积物-海水界面 NO<sub>3</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 的交换,然而并不适用于解释 NO<sub>2</sub>-N 交换速率的变化( $P>0.695$ ),分析结果如表 7 所

示。依据环境变量在回归模型中的权重(表 7)可以看出,Chl *a*、TOC、含水率以及底层 NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NO<sub>3</sub>-N 浓度是影响夏季沉积物-海水界面 NO<sub>3</sub>-N 交换的主要正相关因子,由此可推知,沉积物中有机质的矿化作用是影响夏季胶州湾沉积物-海水界面 NO<sub>3</sub>-N 交换的重要过程。夏季沉积物表现为 NH<sub>4</sub>-N 的源,有机氮的矿化是沉积物中 NH<sub>4</sub>-N 的主要来源,然而主成分回归分析的结果表明表层沉积物中 TOC 是影响界面 NH<sub>4</sub>-N 交换的主要负相关因子,考虑到夏季胶州湾沉积物中有机质的含量和底栖藻类丰度相耦合,由此可推知,这可能是由于底栖藻类的同化作用掩盖了由 TOC 含量变化引起的交换速率波动。综上可知,有机质的矿化和底栖藻类的同化作用是调控夏季胶州湾沉积物-海水界面 NH<sub>4</sub>-N 交换的主要过程,而 NO<sub>2</sub>-N 交换速率对环境因子的响应与 NH<sub>4</sub>-N 比较一致,因此硝化作用可能是调控 NO<sub>2</sub>-N 交换的主要过程。

表 7 环境变量与主成分的关系及各环境变量在回归模型中的权重

Tab. 7 Composition of principle components and weights of environmental variability in regression model

季节	环境因子	主成分回归模型中的权重		
		NO <sub>3</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N	NH <sub>4</sub> -N
夏季	Chl <i>a</i>	0.143	-0.086	-0.092
	TOC	0.143	-0.086	-0.092
	TN	0.137	-0.083	-0.088
	C/N	-0.054	0.032	0.035
	黏土含量	0.114	-0.069	-0.073
	D <sub>50</sub>	-0.088	0.053	0.056
	含水率	0.159	-0.096	-0.103
	底层 NO <sub>3</sub> -N	0.137	-0.083	-0.089
	底层 NO <sub>2</sub> -N	0.121	-0.073	-0.078
	底层 NH <sub>4</sub> -N	0.154	-0.093	-0.100
	间隙水中 NO <sub>3</sub> -N	0.025	-0.015	-0.016
	间隙水中 NO <sub>2</sub> -N	0.043	-0.026	-0.027
间隙水中 NH <sub>4</sub> -N	-0.024	0.015	0.016	
冬季	Chl <i>a</i>	-0.188	—	0.168
	TOC	0.053	—	-0.075
	TN	0.001	—	-0.045
	C/N	0.117	—	-0.115
	黏土含量	0.011	—	-0.154
	D <sub>50</sub>	-0.046	—	0.200
	含水率	-0.039	—	-0.038
	底层 NO <sub>3</sub> -N	-0.084	—	0.122
	底层 NO <sub>2</sub> -N	-0.145	—	0.167
	底层 NH <sub>4</sub> -N	0.027	—	-0.004
	间隙水中 NO <sub>3</sub> -N	0.188	—	0.074
	间隙水中 NO <sub>2</sub> -N	0.362	—	-0.016
间隙水中 NH <sub>4</sub> -N	0.275	—	-0.124	

注: 权重是指某一指标在整体评价中的相对重要程度, 无单位



表层沉积物的 C/N、Chl *a* 以及底层 NO<sub>2</sub>-N 和间隙水中 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 是影响冬季沉积物-海水界面 NO<sub>3</sub>-N 交换的主要环境因子, 其中, C/N 和间隙水中 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 是正相关因子, 而 Chl *a* 和底层 NO<sub>2</sub>-N 是负相关因子, 由此可推知, 底栖藻类的同化作用和扩散可能是影响冬季底层 NO<sub>3</sub>-N 交换的主要过程。分析不同环境因子对冬季底层 NH<sub>4</sub>-N 交换速率的权重可知, Chl *a*、D<sub>50</sub>、底层 NO<sub>3</sub>-N 和底层 NO<sub>2</sub>-N 是影响底层 NH<sub>4</sub>-N 交换的主要正相关因子, 而黏土含量和间隙水中 NH<sub>4</sub>-N 是主要负相关因子, 因此海洋内源有机质的降解和吸附-解吸作用是调控冬季沉积物-海水界面 NH<sub>4</sub>-N 交换的主要过程。另外, 分析结果表明间隙水中 NH<sub>4</sub>-N 浓度越高, 沉积物中 NH<sub>4</sub>-N 越不容易向水体迁移, 这与扩散原理相悖, 具体原因并不明确, 有待进一步探索。与夏季相似, 冬季胶州湾沉积物-海水界面 NO<sub>2</sub>-N 交换速率对环境因子的响应与 NH<sub>4</sub>-N 比较一致, 因此硝化作用可能也是调控冬季 NO<sub>2</sub>-N 交换的主要过程。

### 2.3 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 在胶州湾沉积物-海水界面的交换通量

依据不同站位表层沉积物的粒径分布可知, S3、S8 和 S9 站位的沉积物属于粉砂质砂型, S10 属于砂质粉砂型, 而 S4、S5、S6、S7 和 S11 站位的沉积物属于黏土质粉砂型。根据本实验测得的不同类型沉积物对应的营养盐交换速率和张帆等<sup>[32]</sup>对胶州湾潮滩 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 交换速率的调查结果, 结合胶州湾不同类型沉积物所占的比例, 可估算出胶州湾沉积物-海水界面 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 的交换通量。从表 7 可知, 夏季胶州湾沉积物整体表现为水体 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 的源, 其交换通量分别为 2.35×10<sup>8</sup>、6.35×10<sup>7</sup>、1.34×10<sup>9</sup> mmol/d, 与蒋凤华等<sup>[16]</sup>的调查结果一致; 而冬季沉积物表现为水体 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 的汇, 其交换通量分别为 -6.39×10<sup>7</sup>、-1.49×10<sup>7</sup> 和 -1.33×10<sup>8</sup> mmol/d。

表 8 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 在沉积物-海水界面的交换通量

Fig. 8 Exchange fluxes of NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, and NH<sub>4</sub>-N at sediment-water interface

季节	交换通量 (mmol/d)		
	NO <sub>3</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N	NH <sub>4</sub> -N
夏季	2.35×10 <sup>8</sup>	6.35×10 <sup>7</sup>	1.34×10 <sup>9</sup>
冬季	-6.39×10 <sup>7</sup>	-1.49×10 <sup>7</sup>	-1.33×10 <sup>8</sup>

胶州湾的夏季月度平均初级生产力约为 835.72 mgC/(m<sup>2</sup>·d)<sup>[33]</sup>, 根据 Redfield 比值进行估算, 维持初级生产力需要消耗的 N 为 10 512 μmol/(m<sup>2</sup>·d), 即整片海域的浮游植物所需的 N 为 4.17×10<sup>9</sup> mmol/d。将夏季沉积物-海水界 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 交换通量之和作为 DIN 的平均交换通量, 则胶州湾沉积物-海水界面 DIN 的夏季交换通量为 1.64×10<sup>9</sup> mmol/d, 可以提供初级生产力所需 N 的 39.3%; 而冬季沉积物表现为水体 DIN 的汇, 其交换通量为 -2.12×10<sup>8</sup> mmol/d。

### 3 结论

利用实验室培养法, 调查了原位溶氧和温度条件下胶州湾沉积物-海水界面 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 的交换速率, 并测定了表层沉积物中 Chl *a*、TOC、TN、C/N、黏土含量、D<sub>50</sub> 和含水率及底层水体和间隙水中 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 的浓度, 利用相关分析和主成分回归分析探讨了底层环境因子对沉积物-海水界面溶解无机氮交换的影响, 获得主要结论如下:

(1) 胶州湾沉积物-海水界面无机氮主要以 NO<sub>3</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 的形态进行交换, 夏季胶州湾沉积物-海水界面 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 的交换速率分别为 -714~1 560、-41~941 和 112~26 064 μmol/(m<sup>2</sup>·d), DIN 的交换通量为 1.64×10<sup>9</sup> mmol/d, 可以提供初级生产力所需 N 的 39.3%。而冬季 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 在沉积物-海水界面交换速率分别为 -657~637、-117~-20 和 -1 334~463 μmol/(m<sup>2</sup>·d), 沉积物表现为水体 DIN 的汇, 其交换通量为 -2.12×10<sup>8</sup> mmol/d。

(2) 在夏季, 沉积物中有机质的矿化和扩散是调控胶州湾沉积物-海水界面 NO<sub>3</sub>-N 交换的主要过程, 而有机质的矿化和底栖藻类的同化作用是调控夏季胶州湾沉积物-海水界面 NH<sub>4</sub>-N 交换的主要过程, 而 NO<sub>2</sub>-N 的交换可能主要受硝化作用调控。

(3) 在冬季, 沉积物-海水界面 NO<sub>3</sub>-N 的交换受底栖藻类的同化作用和扩散共同调控。而海洋内源有机质的矿化和吸附-解吸作用是调控冬季沉积物-海水界面 NH<sub>4</sub>-N 交换的主要过程, 冬季 NO<sub>2</sub>-N 交换可能也主要受硝化作用调控。

#### 参考文献:

[1] Ryther J H, Dunstan W M. Nitrogen, phosphorus, and eutrophication in the coastal marine environment[J]. Science, 1971, 171(3975): 1008-1013.  
 [2] Nixon S W, Ammerman J W, Atkinson L P, et al. The fate of nitrogen and phosphorus at the land sea margin

- of the North Atlantic Ocean[J]. *Biogeochemistry*, 1996, 35(1): 141-180.
- [3] 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(1-3): 229-245.
- [4] 王修林, 辛宇, 石峰, 等. 溶解无机态营养盐在渤海沉积物-海水界面交换通量研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2007, 37(5): 795-800.  
Wang Xiulin, Xin Yu, Shi Feng, et al. Benthic exchange rates and fluxes of dissolved inorganic nitrogen at the sediment-water interface in Jiaozhou Bay[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2007, 37(5): 795-800.
- [5] Nixon S W, Pilson M E Q. Nitrogen in estuarine and coastal ecosystems[M]. Carpenter E J, Capone D B. *Nitrogen in the Marine Environment*. New York: Academic Press, 1983.
- [6] Song J M. Sediment-seawater interface research in China[M]. Beijing: Sciences Press. 1997.
- [7] Hall P O J, Hulth S, Hulthe G, et al. Benthic nutrient fluxes on a basin-wide scale in the Skagerrak (north-eastern North Sea)[J]. *Journal of Sea Research*, 1996, 35(1-3): 123-137.
- [8] Kemp W M, Sampou P A, Garber J, et al. Seasonal depletion of oxygen from bottom waters of Chesapeake Bay - Roles of benthic and planktonic respiration and physical exchange processes[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1992, 85(1-2): 137-152.
- [9] Rysgaard S, Thastum P, Dalsgaard T, et al. Effects of salinity on  $\text{NH}_4^+$  adsorption capacity, nitrification, and denitrification in Danish estuarine sediments[J]. *Estuaries*, 1999, 22(1): 21-30.
- [10] Vouve F, Guiraud G, Marol C, et al.  $\text{NH}_4^+$  turnover in intertidal sediments of Marennes Oleron Bay (France): effect of sediment temperature[J]. *Oceanol Acta*, 2000, 23(5): 575-584.
- [11] 石峰. 营养盐在东海沉积物—海水界面交换速率和交换通量的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2003.  
Shi Feng. Benthic exchange rates and fluxes of dissolved nutrients at the sediment-water interface in the East China Sea[D]. Ocean University of China, 2003.
- [12] Van Luijn F, Boers P C M, Lijklema L, et al. Nitrogen fluxes and processes in sandy and muddy sediments from a shallow eutrophic lake[J]. *Water Research*, 1999, 33(1): 33-42.
- [13] Webb A P, Eyre B D. Effect of natural populations of burrowing thalassinidean shrimp on sediment irrigation, benthic metabolism, nutrient fluxes and denitrification[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2004, 268: 205-220.
- [14] Belley R, Snelgrove P V R, Archambault P, et al. Environmental drivers of benthic flux variation and ecosystem functioning in Salish Sea and Northeast Pacific sediments[J]. *PloS one*, 2016, 11(3): 151-160.
- [15] 沈志良. 胶州湾营养盐结构的长期变化及其对生态环境的影响[J]. *海洋与湖沼*, 2002, 33(3): 322-331.  
Shen Zhiliang. Long-term changes in nutrient structure and its influences on ecology and environment in Jiaozhou Bay[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, 33(3): 322-331.
- [16] 蒋凤华, 王修林, 石晓勇, 等. 溶解无机氮在胶州湾沉积物-海水界面上的交换速率和通量研究[J]. *海洋科学*, 2004, 28(4): 13-18.  
Jiang Fenghua, Wang Xiulin, Shi Xiaoyong, et al. Benthic exchange rates and fluxes of dissolved inorganic nitrogen at the sediment-water interface in Jiaozhou Bay[J]. *Marine Sciences*, 2004, 28(4): 13-18.
- [17] 李肖娜, 周伟华, 刘素美, 等. 东海赤潮高发区沉积物中叶绿素的分析[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(7): 1102-1106.  
Li Xiaona, Zhou Weihua, Liu Sumei, et al. Sediment chlorophyll in HAB (harmful algal bloom) area of East China Sea[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(7): 1102-1106.
- [18] 焦念志. 一种新的叶绿素高效萃取剂及其应用方法[J]. *海洋科学*, 1994, 18(3): 20.  
Jiao Nianzhi. A New chlorophyll extractant and its usage[J]. *Marine Sciences*, 1994, 18(3): 20.
- [19] 夏滨, 郑晓玲, 何鹰. 常规荧光法与同步荧光法用于浒苔叶绿素 a 测定的比较研究[J]. *现代科学仪器*, 2012, (3): 60-63.  
Xia Bin, Zheng Xiaoling, He Ying. Comparison of Two Fluorometric Methods for Chlorophyll a Measurement in *Enteromorpha Prolifera*[J]. *Modern Scientific Instruments*, 2012(3): 60-63.
- [20] Seiki T, Izawa H, Date E. Benthic nutrient remineralization and oxygen-consumption in the coastal area of Hiroshima Bay[J]. *Water Research*, 1989, 23(2): 219-228.
- [21] 蔡立胜, 方建光, 董双林. 桑沟湾养殖海区沉积物-海水界面氮、磷营养盐的通量[J]. *海洋水产研究*, 2004, 25(4): 57-64.  
Cai Lisheng, Fang Jianguang, Dong Shuanglin. Preliminary studies on nitrogen and phosphorus fluxes between seawater and sediment in Sungo Bay[J]. *Marine Fisheries Research*, 2004, 25(4): 57-64.
- [22] 胡佶, 张传松, 王修林, 等. 东海春季赤潮前后沉积物-海水界面营养盐交换速率的研究[J]. *环境科学*, 2007, 28(7): 1442-1448.  
Hu Ji, Zhang Chuansong, Wang xiulin, et al. Exchange rates of dissolved nutrients at the sediment-water interface before and after diatom bloom in the East China Sea in spring[J]. *Environmental Science*, 2007, 28 (7): 1442-1448.
- [23] 李玲玲. 黄河口湿地沉积物中营养盐分布及交换通量的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.  
Li Lingling. Study on distribution and benthic fluxes of nutrients in sediment of the Yellow River estuary wetland[D]. Ocean University of China, 2010.

- [24] Tyler A C, Mcglathery K J, Anderson I C. Benthic algae control sediment-water column fluxes of organic and inorganic nitrogen compounds in a temperate lagoon[J]. *Limnology and Oceanography*, 2003, 48(6): 25-37.
- [25] Wang S R, Jiao L X, Jin X C, et al. Inorganic nitrogen release kinetics and exchangeable inorganic nitrogen of the sediments from shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River region[J]. *Water Environ J*, 2014, 28(1): 38-44.
- [26] Hammond D E, Giordani P, Berelson W M, et al. Diagenesis of carbon and nutrients and benthic exchange in sediments of the Northern Adriatic Sea[J]. *Marine Chemistry*, 1999, 66(1-2): 53-79.
- [27] Hall P O J, Hulth S, Hulthe G, et al. Benthic nutrient fluxes on a basin-wide scale in the Skagerrak (north-eastern North Sea)[J]. *Journal of Sea Research*, 1996, 35(1-3): 123-137.
- [28] Camdevyren H, Demyr N, Kanik A, et al. Use of principal component scores in multiple linear regression models for prediction of Chlorophyll-a in reservoirs[J]. *Ecological Modelling*, 2005, 181(4): 581-589.
- [29] Kumar A, Goyal P. Forecasting of air quality in Delhi using principal component regression technique[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2011, 2(4): 436-444.
- [30] Lee Y, Ha S Y, Park H K, et al. Identification of key factors influencing primary productivity in two river-type reservoirs by using principal component regression analysis[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(4): 1-12.
- [31] Zhang W, Lou I C, Kong Y, et al. Eutrophication analyses and principle component regression for two subtropical storage reservoirs in Macau[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2013, 51(37-39): 31-40.
- [32] 张帆. 胶州湾贝类增殖养殖潮滩沉积物—水界面氮、磷交换通量研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011. Zhang Fan. Study on the exchange fluxes of nitrogen and phosphate at the sediment-water interface in the clam culture tidal flat of Jiaozhou Bay[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.
- [33] 孙松, 张永山, 吴玉霖, 等. 胶州湾初级生产力周年变化[J]. *海洋与湖沼*, 2005, 36(6): 481-486. Sun Song, Zhang Yongshan, Wu Yulin, et al. Annual variation of primary productivity in Jiaozhou Bay[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2005, 36(6): 481-486.

## Benthic exchange of dissolved inorganic nitrogen and impact of relevant environmental factors at sediment-water interface in Jiaozhou Bay

WANG Ya-lu<sup>1, 2, 3</sup>, YUAN Hua-mao<sup>1, 2, 3</sup>, SONG Jin-ming<sup>1, 2, 3</sup>, LI Xue-gang<sup>1, 2, 3</sup>, LI Ning<sup>1, 2, 3</sup>, QU Bao-xiao<sup>1, 3</sup>, KANG Xu-ming<sup>1, 3</sup>, WANG Qi-dong<sup>1, 2, 3</sup>, XING Jian-wei<sup>1, 2, 3</sup>, LIANG Xian-meng<sup>1, 2, 3</sup>

(1. Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China)

**Received:** May.15, 2016

**Key words:** Jiaozhou Bay; sediment-water interface; dissolved inorganic nitrogen; exchange rate; environmental factor

**Abstract:** Benthic exchange rates of dissolved inorganic nitrogen (DIN) at the sediment-water interface in Jiaozhou Bay are measured using intact sediment core incubation. Sediment is found to be an important source of DIN in summer, with a flux of  $1.64 \times 10^9$  mmol/d, providing 39.3% of the nitrogen required in primary productivity. However, DIN transfers from the water column to sediment at a flux rate of  $-2.12 \times 10^8$  mmol/d in winter. Results of correlation analysis and principle component regression analysis are used to discuss impacts of environmental factors on the exchange in detail, and it is determined that mineralization, assimilation, and diffusion are the key processes controlling the exchange of DIN at the sediment-water interface in Jiaozhou Bay during summer. However, exchange of DIN is probably significantly influenced by degradation of marine endogenous organic matter, assimilation, adsorption-desorption, and diffusion during winter.

(本文编辑: 康亦兼)