

## 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

蒋凤华, 王修林, 石晓勇, 祝陈坚, 胡海燕, 韩秀荣

(中国海洋大学 化学化工学院, 山东 青岛 266003)

**摘要:**应用实验室培养法测定了溶解无机氮(DIN)在胶州湾16个站位沉积物-海水界面上的交换速率。结果表明,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的交换速率一般分别在 $-0.5\sim 1.6$ ,  $0.005\sim 0.67$ ,  $-2.0\sim 2.8\text{ mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 范围内。由于间隙水中DIN主要以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 形态存在, DIN在胶州湾沉积物-海水界面上的交换以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的扩散为主, 在大部分站位表现为由沉积物向水体的释放,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 主要来自 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的硝化反应, 而 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 是 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 之间化学转化过程的中间产物。考虑胶州湾沉积物类型, DIN在胶州湾沉积物-海水界面上的交换通量为 $9.68 \times 10^8\text{ mmol}/\text{d}$ , 是河流输入DIN的50%左右, 可提供维持胶州湾初级生产力所需DIN的52%。

**关键词:**溶解无机氮(DIN); 胶州湾; 沉积物-海水; 交换; 速率; 通量

**中图分类号:** P736.212 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2004)04-0013-06

随着排入胶州湾的工业废水和生活污水日益增加, 胶州湾海水富营养化程度不断加剧, 有可能引发赤潮灾害。20世纪60年代至90年代, 胶州湾营养盐浓度发生了显著变化, 尤其从60年代至80年代, 硝酸盐( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ )和氨氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )浓度分别增加了7倍以上, 溶解无机氮(DIN)平均浓度已超过 $10\text{ mmol}/\text{m}^3$ [1]。DIN在沉积物-海水界面上的交换过程对水体中氮的收支、循环动力学和初级生产力水平有着极其重要的作用[2-7], 但是尚没有见到有关氮营养盐在胶州湾沉积物-海水界面上的交换过程的研究报道。

营养盐在沉积物-海水界面上的交换速率可以采用现场测定、实验室培养、间隙水浓度梯度估算等方法研究[3,8-10], 其中实验室培养法具有简便, 实验结果比较准确的优点[9]。因此, 作者采用实验室培养法测定DIN在胶州湾沉积物-海水界面上的交换速率和通量, 这对于研究胶州湾海水中氮的迁移、转化过程以及循环动力学模型的建立等都具有重要的科学意义。

## 1 实验部分

于2001年7月用4管沉积物采集器在胶州湾16个站位(图1)采集未扰动的柱状沉积物样品

( $\Phi_{\text{内}}=10\text{ cm}$ )。样品采集后, 将2管沉积物样品分别置于PVC管中, 缓慢地加入一定体积的 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 醋酸纤维滤膜过滤的现场海水进行培养实验, 同时以不加沉积物的现场过滤海水作对照实验。实验在恒温循环水( $24\text{ }^\circ\text{C}$ )和避光的PVC箱中进行, 培养过程中用AtmanII充气泵扰动使培养管内水体充分混合, 速度以不扰动沉积物表面为限。根据海水中DIN浓度的变化, 在不同时刻取出一定体积的海水, 用 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 醋酸纤维滤膜过滤后冷冻保存至分析。采用离心法( $5\text{ }000\text{ r}/\text{min}$ ,  $20\text{ min}$ )从另1管沉积物样品中制得间隙水, 然后经 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 醋酸纤维滤膜过滤后冷冻保存至分析。分别根据靛酚蓝

收稿日期: 2003-01-21; 修回日期: 2003-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(40136020, 49976027); 教育部重点项目(01110); 省基金(L2000E01); 跨世纪优秀人才培养计划基金和国家973重点基础研究发展规划项目(001CB 409703)

作者简介: 蒋凤华(1977-), 女, 山东德州人, 博士生, 研究方向: 海洋环境化学, E-mail: jiangfh@mail.ouc.edu.cn; 王修林, 通讯作者, 电话: 0532-2032479, E-mail: xlwang@mail.ouc.edu.cn

法、重氮偶氮法、Cd/Cu 还原-重氮偶氮法<sup>[11]</sup>，采用 Technicon™ AA-II 自动分析仪测定  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ， $\text{NO}_2^-\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ，检出限分别为 0.2，0.04 和 0.1  $\text{mmol/m}^3$ ，分析误差分别为  $\pm 2\%$ ， $\pm 1\%$  和  $\pm 4\%$ 。

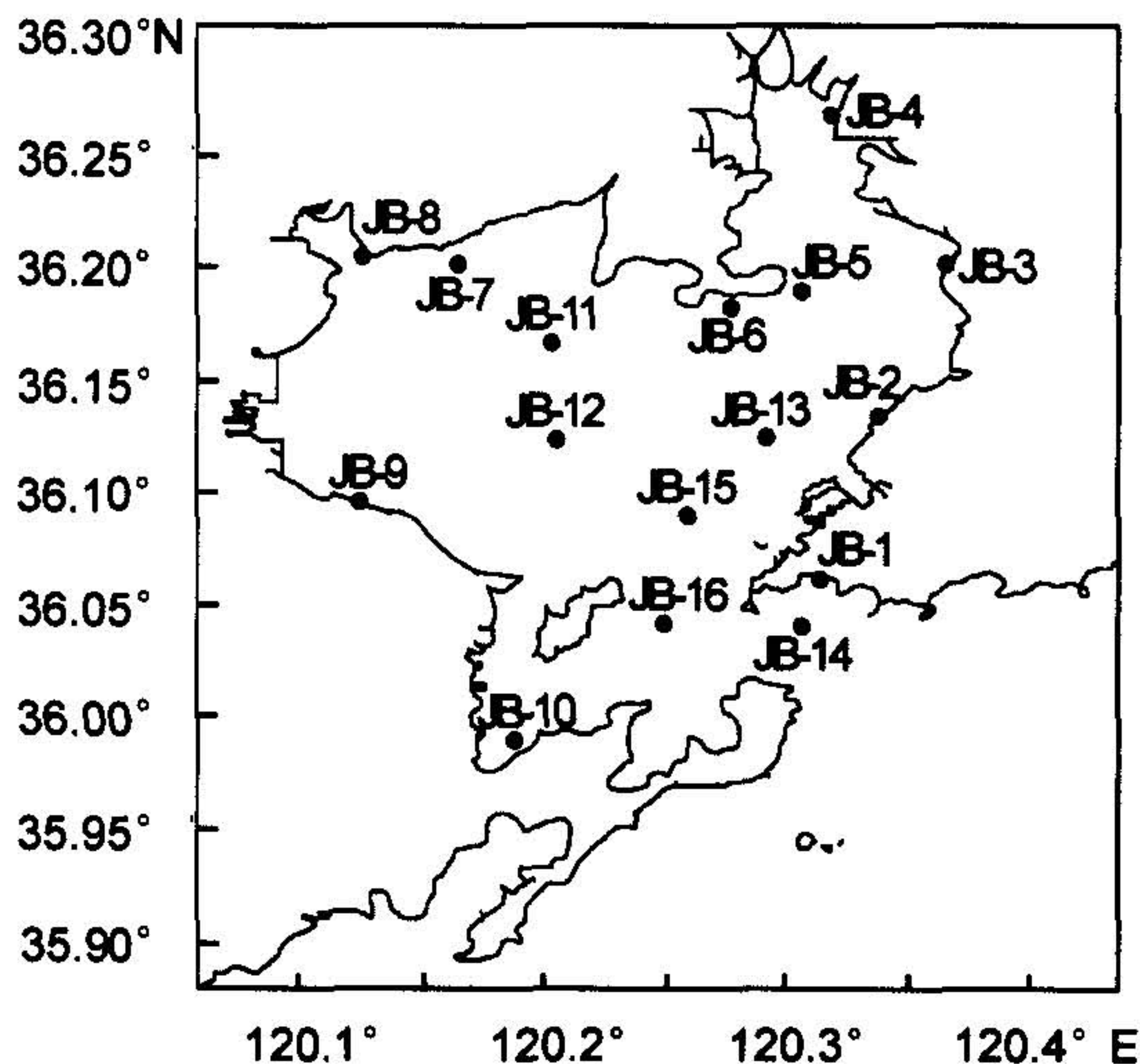


图1 胶州湾取样站位  
Fig.1 Sampling stations in Jiaozhou Bay

## 2 结果与讨论

### 2.1 DIN 在沉积物-海水界面上的交换量

根据培养实验水体中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ， $\text{NO}_2^-\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度随培养时间的变化，同时考虑由于取样而引起的海水体积变化对交换量的影响，可以得到  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ， $\text{NO}_2^-\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  在沉积物-海水界面上的交换量 ( $M$ ) 随培养时间的变化曲线<sup>[12,13]</sup>，其典型代表曲线见图 2。

结果表明， $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ， $\text{NO}_2^-\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  在沉积物-海水之间的交换量变化曲线随沉积物的不同而不同。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  一般由沉积物向水体释放，交换量随培养时间的增加而增加，达到最大值以后逐渐减少，但在 JB-1，JB-5，JB-7 和 JB-8 站位的交换量趋近于 0，而在 JB-14 和 JB-15 站位的交换则表现为向沉积物转移。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  交换量随培养时间的增加一般呈“S”形变化，在大部分站位表现为由沉积物向海水转移，但在 JB-2，JB-11，JB-14 和 JB-15 站位的交换量趋近于 0。而在 JB-3 和 JB-4 站位沉积物-海水界面上的交换则表现为由海水向沉积物的转移。

$\text{NO}_2^-\text{-N}$  交换量一般随培养时间的增加先增加而后减小，并且交换量比较小，但在 JB-3 和 JB-4 站位的交换量则比较大，而且其交换量随着培养时间的增加而指数增加，这可能是由于这两个站位分别位于河流入海口和养殖区，沉积物中含有丰富的污染物和养殖有机质，细菌含量也比较高，由此在微生物作用下  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  通过硝化反应转化为  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  过程中，有更多的中间产物  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  产生。

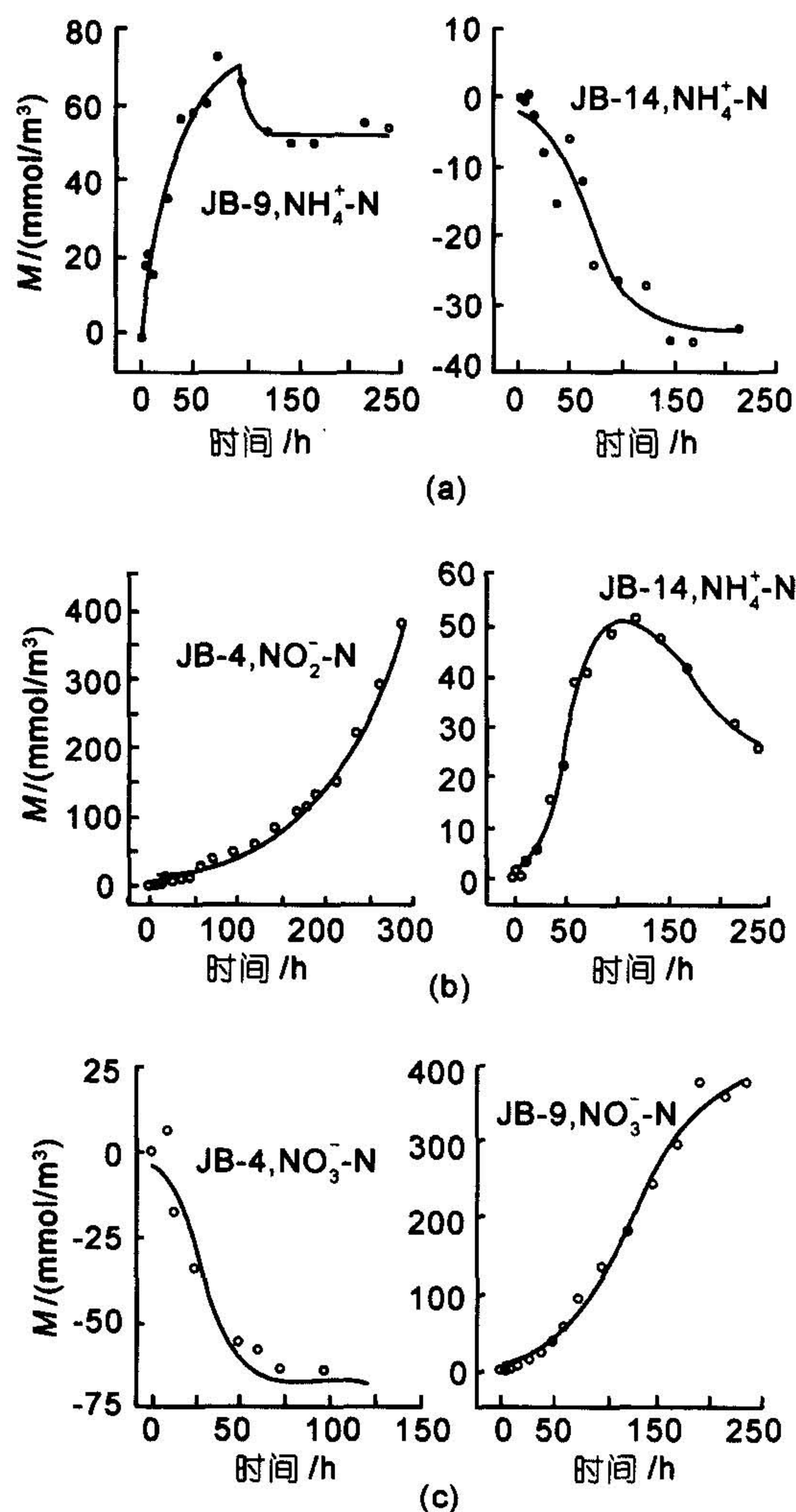


图2  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ， $\text{NO}_2^-\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  在胶州湾沉积物-海水界面上的交换量随培养时间的典型变化曲线，其中实线为方程 (1) 拟合结果

Fig.2 Typical plots of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ， $\text{NO}_2^-\text{-N}$  and  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  xchange amount at the sediment-water interface in Jiaozhou Bay versus time in the incubation experiments, where the solid line is the fitting conducted by equation (1)

总之, DIN在沉积物-海水之间的交换以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 或者 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 为主, 而 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的交换量比较小, 这主要是由于沉积物间隙水中的DIN主要以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 形式存在并且浓度比较高(表1),  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在沉积物-海水界面上的交换主要由间隙水向上覆水的扩散控制, 而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 可能主要是在微生物作用下间隙水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的硝化反应所致,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 则是硝化过程的中间产物。

为了进一步证明微生物作用对于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 交换量的影响, 采用 $\text{HgCl}_2$ 方法消除或减小JB-4 站位沉积物中微生物活动。结果(图3)

表明, 存在微生物活动时, 水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 交换量随培养时间的增加而先增加然后逐渐减少, 但是其占DIN百分比随培养时间的增加而逐渐减少, 而 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 交换量和占DIN的百分比逐渐增大,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 交换量和占DIN的百分比缓慢增加; 消除微生物作用后,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是DIN在沉积物-海水界面上交换的主要形态, 并且其交换量随培养时间增加而增大, 水体中的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 都很少并且基本不变, 这进一步说明 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 通过硝化反应产生 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和中间产物 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 是在微生物作用下进行的。

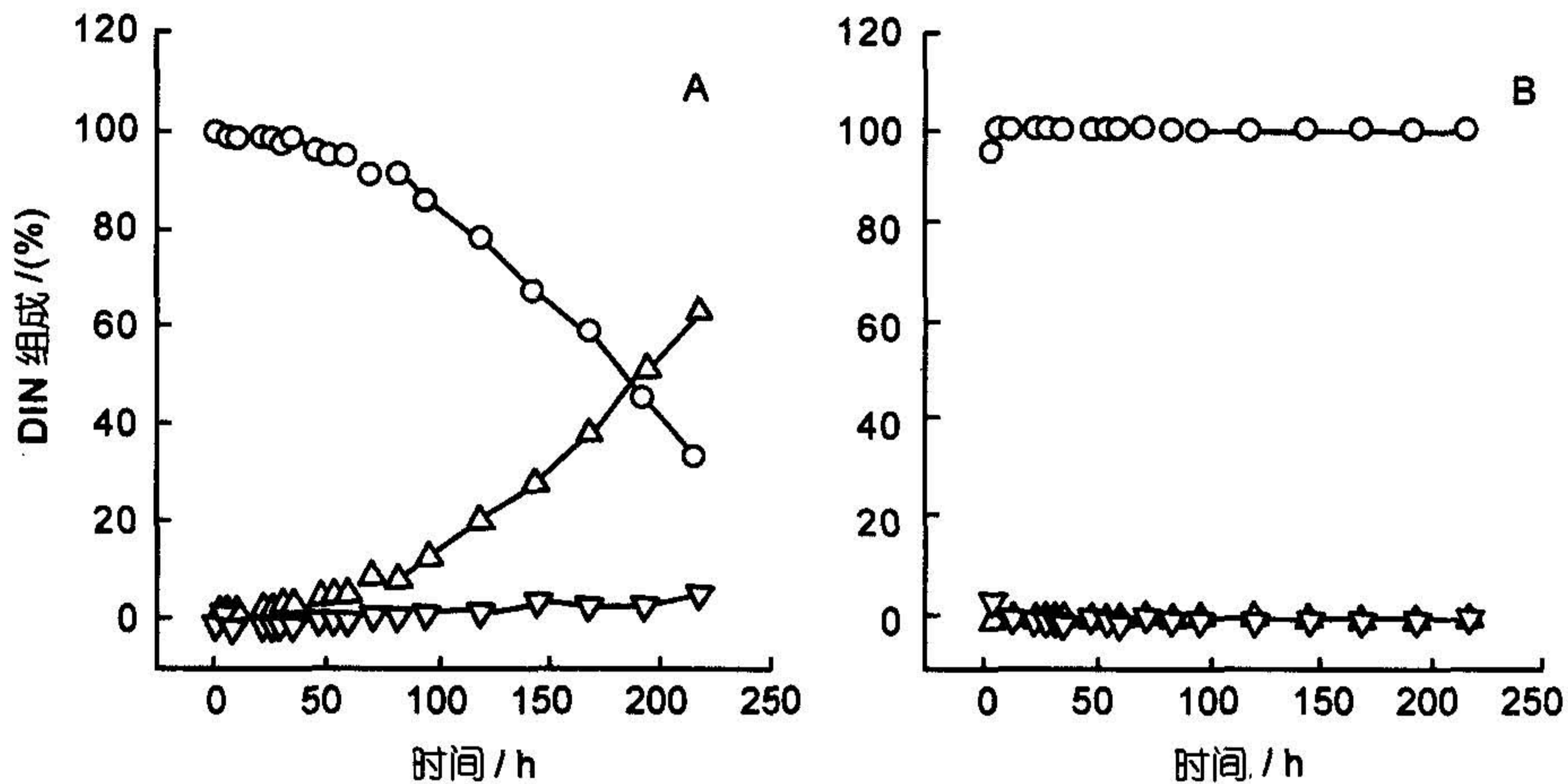


图3 微生物活动对DIN在沉积物-海水界面上的交换过程的影响

Fig.3 Effect of microorganism and bioturbation on the exchange of DIN at the sediment-water interface

—○— $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ; —△— $\text{NO}_2^-\text{-N}$ ; —▽— $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ; A: 存在生物活动; B: 消除生物活动

## 2.2 DIN在沉积物-海水界面上的交换速率

如图2所示,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 交换量随培养时间的变化曲线可很好地应用方程(1)描述:

$$M(t) = \frac{M_1 - M_2}{1 + e^{-t/t_1}} + M_2$$

式中,  $M_1$ ,  $M_2$ 为 $t_1$ ,  $t_2$ 时间的交换量。这样, 根据交换速率连续函数计算方法<sup>[12,13]</sup>, 应用非线性拟合技术(如Origin 6.0, Microcal Soft Inc.)可以得到 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在胶州湾沉积物-海水界面上的交换速率(表1)。结果表明,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 交换速率一般分别在 $-0.5 \sim 1.6$ ,  $0.005 \sim 0.67$ 和 $-2.0 \sim 2.8 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 范围内, 但对于JB-3 站位沉积物其交换速率分别可高达

48, 3.7 和  $-0.70 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ , 对于JB-4 站位沉积物其交换速率可分别高达1.6, 6.2 和  $-2.0 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

图4表明, 除JB-3和JB-4 站位外, 其他站位沉积物的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 交换速率之和与间隙水中DIN浓度之间存在较好的线性关系( $R=0.72$ ,  $P<0.02$ )。这进一步说明, 由于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是间隙水中DIN的主要存在形态, 因此 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在沉积物-海水界面上的交换主要是由 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的浓差扩散控制, 并且在扩散过程中受温度、溶解氧和微生物作用等因素影响而发生硝化-反硝化反应, 从而转化为其它形态溶解无机氮。而对于JB-3和JB-4 站位沉积物, 如上所述, 可能由于沉积物中有机质含量较高等原因, 使其 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 交换速率之和与间隙水浓度的关系偏离相关线性关系(图4)。

表1 胶州湾不同站位沉积物间隙水中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的浓度 ( $c$ ) 及其在沉积物-海水界面上的交换速率 ( $v$ )  
 Tab.1 Concentrations of dissolved inorganic nitrogen in pore water and exchange rates of them at sediment-water interface of different locations in Jiaozhou Bay

站位	$c$ (mmol/m <sup>3</sup> )			$v$ (mmol/(m <sup>2</sup> ·d))		
	$\text{NO}_2^-\text{-N}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{NO}_2^-\text{-N}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	$\text{NH}_4^+\text{-N}$
JB-1	-	-	-	0.011	0.21	→0
JB-2	-	-	-	0.66	→0	0.32
JB-3	10.4	<0.1	165	3.7	-0.70	48
JB-4	1.09	1.1	118	6.2	-2.0	1.6
JB-5	1.61	1.08	573	0.018	1.2	→0
JB-6	1.74	<0.1	280	-0.052	0.74	0.29
JB-7	2.15	0.57	227	0.090	1.1	→0
JB-8	10.3	<0.1	724	0.022	1.4	→0
JB-9	1.58	<0.1	1185	0.19	2.8	0.75
JB-10	1.48	<0.1	338	0.057	1.0	0.23
JB-11	1.72	0.18	156	0.018	→0	0.24
JB-12	1.43	<0.1	156	0.005 8	0.26	0.86
JB-13	1.75	0.18	105	0.004 4	0.25	-0.009 6
JB-14	-	-	-	0.012	→0	-0.41
JB-15	2.12	<0.1	295	0.041	→0	-0.089
JB-16	7.84	0.66	123	0.16	1.1	0.89

注: - 为未测。

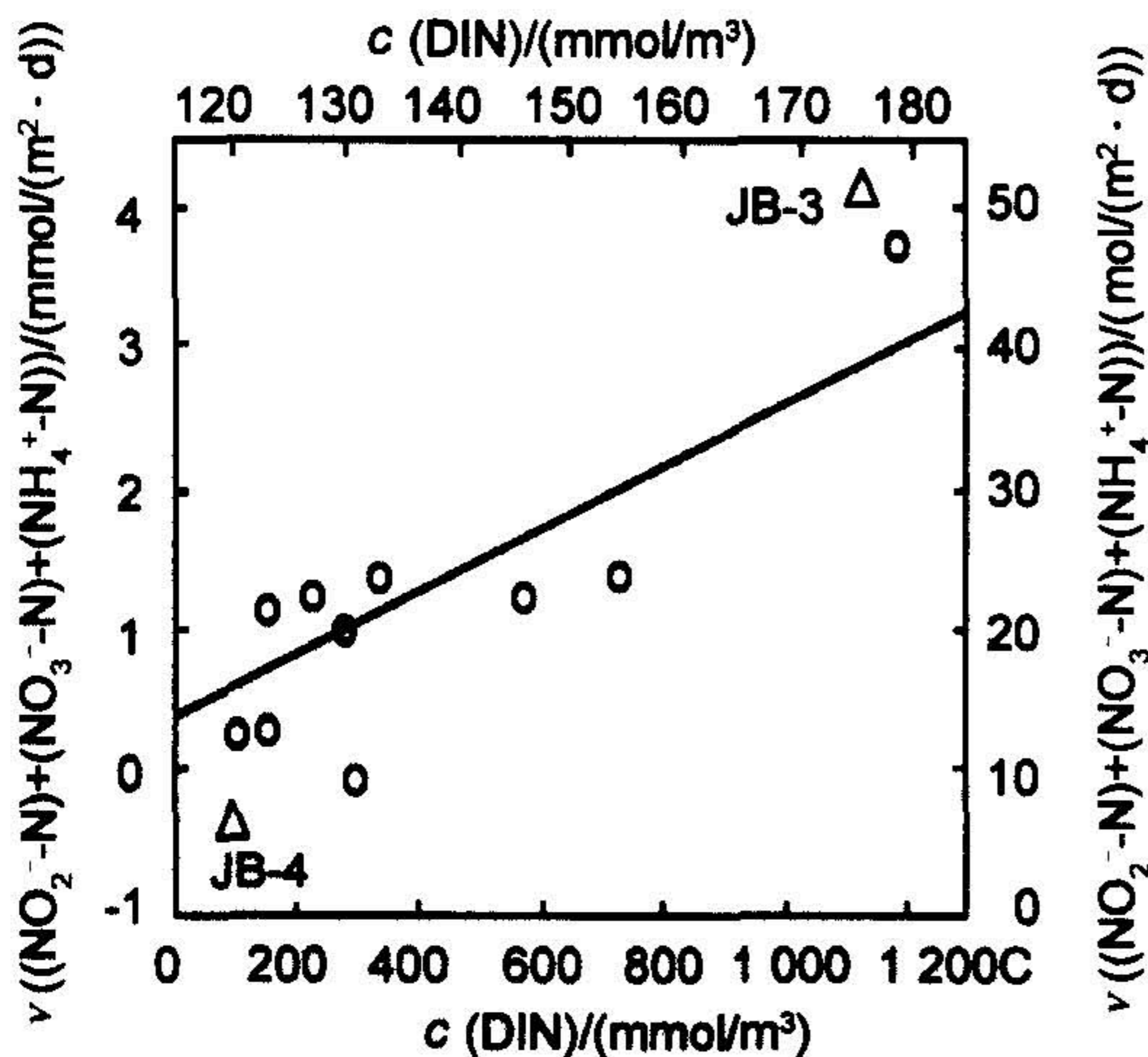


图4  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  在沉积物-海水界面上的交换速率之和与间隙水中 DIN 浓度的关系

Fig.4 Relationship between total exchange rates of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  and  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  and concentrations of DIN in pore water  
 △表示 JB-3, JB-4 站位, 用右纵坐标, 上横坐标表示; ○表示其他站位的, 用左纵坐标, 下横坐标表示。

对比中国近海不同海区 (如渤海<sup>[14]</sup>, 东海<sup>[15]</sup>和南沙群岛海域<sup>[9]</sup>) 的营养盐在沉积物-海水界面交换速率的研究结果, 文献报道的营养盐交换速率比作者的结果小, 甚至小一个数量级 (表 2), 这可能是他们在早期研究中采用营养盐浓度梯度估算法所致<sup>[9]</sup>。然而, 与世界其他海域相比, 胶州湾 DIN 交换速率与 Mobile 河口<sup>[3]</sup>和 Port Phillip 海湾<sup>[7]</sup>的交换速率相近, 比 Skagerrak 海湾<sup>[6]</sup>的交换速率稍大。

### 2.3 溶解无机氮在胶州湾沉积物-海水界面上的交换通量

胶州湾总面积为 397 km<sup>2</sup>, 其中潮间带面积约 103 km<sup>2</sup><sup>[16]</sup>。这样, 考虑到胶州湾潮汐为规则半日潮, 根据  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  在各种类型沉积物-海水界面上的交换速率, 以及各种类型沉积物占海底总面积的权重, 可以估算出  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和总 DIN 的交换通量 (表 3)。

表2 不同海域营养盐在沉积物-海水界面交换速率

Tab.2 Exchange rates of nutrients at the sediment-water interface in different areas

海区	$v$ ( $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ )			资料来源
	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{NO}_2^-\text{-N}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	
胶州湾	-500~1 600	5~670	-200~2 800	作者
渤海	960~2 520	-	38~3 650	[14]
东海	-34.08~14.16	-	-	[15]
长江口	-2.6~3.4	-	-1.4~3.2	[17]
南沙群岛海域	-121.4~745.8	-8.4~15.61	-211.0~208.7	[9]
Mobile 河口	-530~4 340	-	-340~1 610	[3]
Skagerrak 海湾	-61~45	-21~5	-140~304	[6]
Port Phillip Bay	400~1 000	-	-420~910*	[7]

\* ( $\text{NO}_2^-\text{-N}$ ) + ( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ )。

表3 胶州湾不同形态氮营养盐的输入通量

Tab.3 Fluxes of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  and  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  from river and sediment in Jiaozhou Bay

输入类型	输入通量 ( $\text{mmol}/\text{d}$ )				资料来源
	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{NO}_2^-\text{-N}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	DIN	
河流输入	$1.87 \times 10^9$	$2.58 \times 10^7$	$1.60 \times 10^8$	$2.06 \times 10^9$	[18]
沉积物输入	$5.06 \times 10^8$	$2.14 \times 10^8$	$2.48 \times 10^8$	$9.68 \times 10^8$	作者

结果表明, 沉积物向水体释放的总 DIN 是河流 DIN 输入总量的 50% 左右, 其中沉积物向水体释放的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  是 DIN 的主要形式, 其交换通量为河流  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  输入的 30% 左右, 而  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  在沉积物-海水界面上的交换通量分别为河流输入量的 8 倍和 2 倍。这表明 DIN 在沉积物-海水界面上的交换过程对胶州湾海水中的氮有着相当重要的作用。此外, 胶州湾初级生产力以 C 计算约为  $503 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d}) \pm 184 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ <sup>[19]</sup>, 按 Redfield 比值推算, 维持胶州湾初级生产力需 DIN 大约为  $1.86 \times 10^9 \text{ mmol}/\text{d} \pm 0.68 \times 10^9 \text{ mmol}/\text{d}$ , 则沉积物向水体释放的 DIN 可提供浮游植物所需氮的  $52\% \pm 19\%$ , 比东海 (5.1%)<sup>[20]</sup> 和 Carolina 河口区 (28%~35%)<sup>[21]</sup> 沉积物所释放的 DIN 对初级生产力的贡献要高, 而与波士顿港 (40%)<sup>[4]</sup> 相当。

总之, DIN 在胶州湾沉积物-海水上界面的交换以  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的扩散为主, 大部分站位表现为由沉积物向水体的转移。由于间隙水中 DIN 主要以  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  形态存在, DIN 在沉积物-海水界面上的交换以  $\text{NH}_4^+\text{-N}$

N 的扩散为主,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  来自  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的硝化反应, 而  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  是  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  相互转化过程的中间产物。  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  在沉积物-海水界面上的交换速率一般分别在  $-0.5 \sim 1.6$ ,  $-2.0 \sim 2.8$  和  $0.005 \sim 0.67 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  范围内。根据  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  在不同类型沉积物-海水界面上的交换速率, 以及各种类型沉积物占胶州湾海底总面积的权重, 所估算的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  在沉积物-海水界面的交换通量分别为  $5.06 \times 10^8$ ,  $2.48 \times 10^8$  和  $2.14 \times 10^8 \text{ mmol}/\text{d}$ , 总 DIN 交换通量为  $9.68 \times 10^8 \text{ mmol}/\text{d}$ 。这样, DIN 在胶州湾沉积物-海水界面上的交换通量是河流输入 DIN 的 50% 左右, 可提供维持胶州湾初级生产力所需 DIN 的 52%。

参考文献:

- [1] 沈志良. 胶州湾营养盐的动态变化[A]. 董金海, 焦念志. 胶州湾生态学研究[C]. 北京: 科学出版社, 1995. 47-53.
- [2] Fisher T R, Carlson P R, Barber R T. Sediment nutrient Regeneration in Three North Carolina Estuaries[J].

- Estuarine, Coastal and Science*, 1982, 14: 101-116.
- [3] Cowan J L W, Jonathan R P, Walter R B. 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.
- [4] Giblin A E J, Hopkinson C S, Tucker J. Benthic metabolism and nutrient cycling in Boston Harbor[J]. *Massachusetts Estuaries*, 1997, 20(2): 346-364.
- [5] Friedl G, Dinkel C, Wehrli B. Benthic fluxes of nutrients in the northwestern Black Sea[J]. *Marine Chemistry* 1998, 62: 77-88.
- [6] Per O J Hall, 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.
- [7] Berelson W M, Heggie D. Benthic Nutrient Recycling in Port Phillip Bay, Australia[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1998, 46: 917-934.
- [8] 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.
- [9] 宋金明. 中国近海沉积物 - 海水界面化学[M]. 北京: 海洋出版社, 1997. 56-66.
- [10] 刘素美, 黄、渤海沉积物 - 水界面营养盐的交换及其质量平衡[D]. 青岛: 青岛海洋大学, 2000.
- [11] Grasshoff K, Ehrhardt M, Kremling K. *Methods of Seawater Analysis*[M]. New York: Weinheim, 1999. 177-193.
- [12] 蒋凤华, 王修林, 石晓勇, 等. Si 在胶州湾沉积物 - 海水界面上的交换速率和通量研究[J]. 青岛海洋大学学报, 2002, 32(6): 1 012-1 018.
- [13] 蒋凤华, 王修林, 石晓勇, 等. 胶州湾海底沉积物 - 海水界面上磷酸盐的交换速率和通量研究[J]. 海洋科学, 2003, 27(5): 50-53.
- [14] 刘素美, 张经, 于志刚, 等. 渤海莱州湾沉积物 - 水界面溶解无机氮的扩散通量[J]. 环境科学, 1999, 20(2): 12-16.
- [15] 周伟华, 吴云华, 陈绍勇. 南沙群岛海域沉积物间隙水营养盐(氮、磷、硅)的研究南沙海域沉积物间隙水中营养盐垂直分布研究[J]. 热带海洋学报, 2001, 20(4): 49-55.
- [16] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志[M]. 北京: 海洋出版社, 1993. 157-252.
- [17] Aller R C, Mackin J E, Ullman W J, *et al*, Early chemical diagenesis sediment-water solute exchange, and storage of reactive organic matter near the mouth of the Changjiang, East China Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 1985, 4(1/2): 227-251.
- [18] 青岛市环境保护局. 2001 年青岛市环境状况公报[R]. 青岛: 青岛市环境保护局, 2002.
- [19] 王荣, 焦念志, 李超伦, 等. 胶州湾的初级生产力和新生产力[A]. 董金海, 焦念志. 胶州湾生态学研究[C]. 北京: 科学出版社, 1995. 125-137.
- [20] 石峰, 王修林, 石晓勇, 等. 营养盐在东海沉积物 - 海水界面交换通量的初步研究[J]. 海洋环境科学, 2004(待刊).

## Benthic exchange rates and fluxes of dissolved inorganic nitrogen at the sediment-water interface in Jiaozhou Bay

JIANG Feng-hua, WANG Xiu-lin, SHI Xiao-yong, ZHU Chen-jian, HU Hai-yan, HAN Xiu-rong  
(College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

Received: Jan., 21, 2003

Key Words: dissolved inorganic nitrogen (DIN); Jiaozhou Bay; sediment-water; exchange; exchange rates; fluxes

**Abstract:** Intact sediment cores were sampled at 16 sites in Jiaozhou Bay during July 2001. Through laboratory incubation experiments, benthic exchange rates of dissolved inorganic nitrogen (DIN) at the sediment-water interface were measured. Exchange rates ranged from -0.5 to 1.6 mmol/(m<sup>2</sup>·d) for NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, from -0.05 to 0.67 mmol/(m<sup>2</sup>·d) for

(下转第 24 页)

$\text{NO}_2^-$ -N and from  $-2$  to  $2.8$   $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  for  $\text{NO}_3^-$ -N, respectively.  $\text{NH}_4^+$ -N diffusion between pore water and overlying water was thought to be the dominant process of DIN exchange as  $\text{NH}_4^+$ -N was the main form of DIN in pore water. Furthermore, effluxes from sediment to water were observed at most stations.  $\text{NO}_3^-$ -N was thought to come from the nitrification of  $\text{NH}_4^+$ -N while  $\text{NO}_2^-$ -N was produced during their transformation process. Considering the different pattern of sediments in Jiaozhou Bay, the exchange flux of DIN between sediments and seawater was estimated as  $9.68 \times 10^8$   $\text{mmol}/\text{d}$ , about 50% of river input DIN. The exchange flux of DIN from sediment can provide 52% of nitrogen required by phytoplankton in Jiaozhou Bay.

(本文编辑: 张培新)