

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

胡 俊, 张传松, 王修林, 王江涛*

(中国海洋大学海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 青岛 266100)

摘要:应用实验室培养法现场研究了 3~5 月东海硅藻赤潮发生前后 10 个站位的营养盐在沉积物-海水界面的交换, 并应用连续函数拟合法计算了营养盐的界面交换速率. 结果显示, NO_3^- -N 在赤潮前向沉积物中汇聚[$-1.33 \sim -0.68 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$], 赤潮后却基本由沉积物向海水中释放[$-0.69 \sim 0.82 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]. NH_4^+ -N 在赤潮前后大都从沉积物中释放[$-0.65 \sim 1.46 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$], 赤潮后释放速率小于赤潮前. NO_2^- -N 赤潮前后除 Zc17 站外都向沉积物中汇聚[$-0.09 \sim 0.05 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$], 赤潮后汇聚速率稍高. SiO_3^{2-} -Si 在所有站位都由沉积物向海水释放[$0.85 \sim 9.23 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$], 其赤潮后速率高于赤潮前. PO_4^{3-} -P 在赤潮前向沉积物中汇聚[$-0.06 \sim -0.01 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$], 在赤潮后却由沉积物向海水中释放[$0 \sim 1.26 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]. NO_3^- -N 和 PO_4^{3-} -P 向东海近海沉积物的汇聚在春季不利于硅藻赤潮的暴发, 但其在硅藻赤潮暴发后从沉积物的大量释放为后面紧接的大面积甲藻赤潮的暴发提供了重要的营养物质补充.

关键词: 东海; 沉积物-海水界面; 营养盐; 交换速率; 硅藻赤潮

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)07-1442-07

Exchange Rates of Dissolved Nutrients at the Sediment-Water Interface Before and After Diatom Bloom in the East China Sea in Spring

HU Ji, ZHANG Chuan-song, WANG Xiu-lin, WANG Jiang-tao

(Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Exchange rates of dissolved nutrients at the sediment-water interface were studied before and after diatom bloom from March to May in the East China Sea in 2005. Intact sediment cores which were sampled at 10 sites were incubated on board, and exchange rates were calculated in the function method. It was shown that sediment absorbed NO_3^- -N before bloom with the exchange rate ranging from $-1.33 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ to $-0.68 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$. The sediment released NO_3^- -N after bloom with the exchange rate ranging from $-0.69 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ to $0.82 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$. NH_4^+ -N was almost released from sediment with the exchange rate ranging from $-0.65 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ to $1.46 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, and the rate was higher before bloom than that after bloom. NO_2^- -N moved into sediment all along except at Zc17 with the exchange rate ranging from $-0.09 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ to $0.05 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, and the rate was a little higher after bloom than that before bloom. SiO_3^{2-} -Si was released from sediment all the time with the exchange rate ranging from $0.85 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ to $9.23 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, and the rate was higher after bloom than that before bloom. The sediment absorbed PO_4^{3-} -P before bloom with the exchange rate ranging from $-0.06 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ to $-0.01 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, but released PO_4^{3-} -P after bloom with the exchange rate ranging from $0 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ to $1.26 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$. PO_4^{3-} -P and NO_3^- -N which were absorbed by sediment in spring restricted the diatom bloom, but their release from sediment after diatom bloom may make a great contribution to subsequent dinoflagellate bloom.

Key words: East China Sea; sediment-water interface; nutrients; exchange rate; diatom bloom

海水中的 N、P、Si 是海洋生态系统中非常重要的营养元素, 海水-沉积物界面是海洋中的重要界面之一, 通过沉积物向海水释放的营养物质是海洋营养物质总输入量的重要组成部分, 有时候其营养盐输入量甚至超过河流输入量成为海域营养盐浓度水平主要控制因素. Zabel 等研究指出南大西洋东部底界面硅的通量是该地区主要陆源(Zaire 河)溶解硅输入量的 4 倍^[1].

我国自 20 世纪 80 年代开始对东海、黄海、渤海、南海等海域沉积物-海水界面的物质交换进行研究以来, 已取得了一些成果^[2-9]. 宋金明于 1987 年

应用间隙水浓度梯度法测定了东海 3 个不同区域(长江口外、冲绳海槽区和台湾海峡北)沉积物界面的营养盐交换速率^[5]. 石峰等于 2002~2003 年应用实验室培养法测定了东海沉积物界面一年四季的交换通量^[9]. 近年来中国近海污染状况日益严重, 大规模赤潮频发. 但对于赤潮暴发前后的沉积物-海水界面的营养盐交换速率变化研究, 国内鲜见报道. 本研

收稿日期: 2006-08-23; 修订日期: 2006-12-07

基金项目: 科技部国际科技合作重点项目(2004DFA03600); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2001CB409703)

作者简介: 胡俊(1982~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋沉积物界面化学, E-mail: huji1982@sohu.com

* 通讯联系人, E-mail: jtwang@ouc.edu.cn

究应用实验室现场培养法测定了东海赤潮高发区海域春季硅藻赤潮暴发前后沉积物-海水界面的营养盐交换速率,并分析了导致东海沉积物-海水界面营养盐的交换速率在赤潮前后变化的原因.

1 材料与方法

1.1 样品采集

2005 年 3 月底到 4 月中旬,浙江中部海域暴发中肋骨条藻和海链藻赤潮.于 2005-03-27 ~ 2005-03-31 和 2005-04-27 ~ 2005-05-09 分 2 个航次在赤潮高发区使用沉积物多管采样器(国家海洋局第二研究所)采集赤潮暴发前期和后期的海底柱状沉积物进行现场培养.该区域位于东海西北部的陆架浅海区,主要受长江冲淡水、江浙沿岸流和台湾暖流影响.长江冲淡水营养盐输送具有双向扩展特点,一是向南

或东南输入东海,二是向北或东北输入南黄海西南部;5 ~ 9 月长江冲淡水主体向东北方向扩展,少部分贴岸南下,而 10 ~ 4 月则相反^[10~12].江浙沿岸流于 11 月至次年 4 月在偏北季风的驱动下沿岸南下;5 ~ 10 月由南向东北方向扩展,其在表层的分布范围明显扩大.台湾暖流经台湾海峡终年由南向北流动,在春季可以延伸至长江口外与长江冲淡水混合^[4,13].

采样站位如图 1(方框内为赤潮覆盖的海域).其中 ZA3、Za6a、ZB7、ZB12a、Zb8、ZD21 位于赤潮暴发区内;Rb12 位于赤潮暴发区外,但靠近赤潮区;Hb8 远离赤潮区.采样站位分布于浙江近岸北部和南部泥质区,表层沉积物为粘土质粉砂,其组成为:砂,0.4% ~ 0.72%;粉砂,60.89% ~ 75.0%;粘土,25.0% ~ 38.89%^[14].

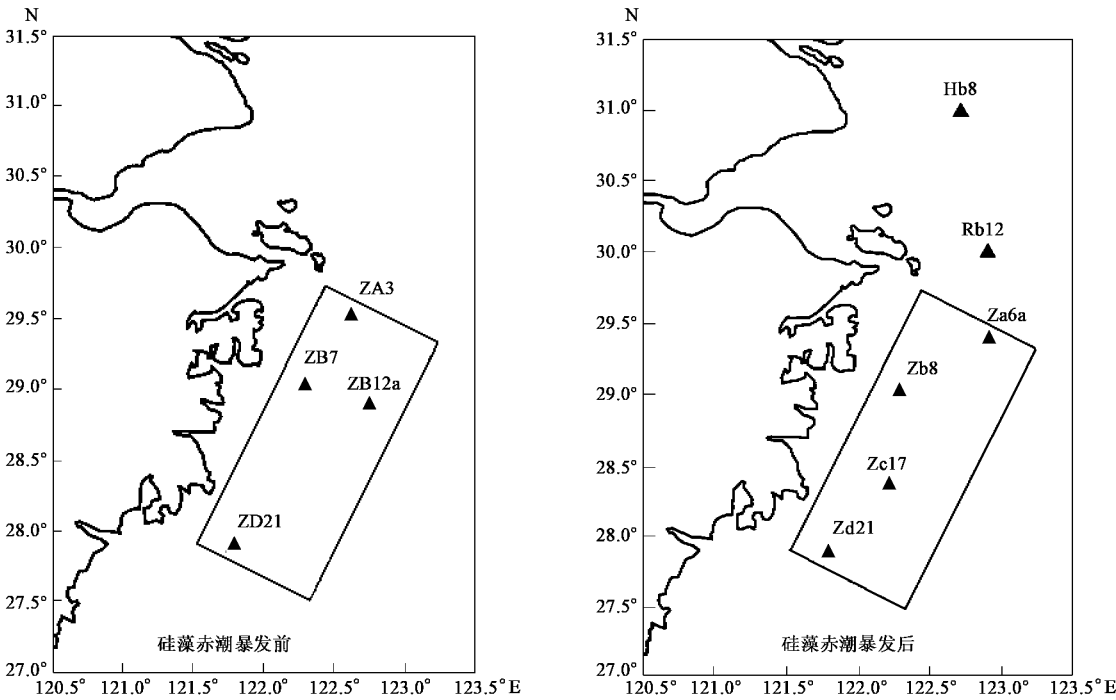


图 1 采样站位
Fig.1 Sampling stations in the East China Sea

1.2 实验方法

截取高度为 10 cm 表层未扰动的沉积物样品,转移至内直径为 10 cm 的 PVC 培养管中,同时采集同站位的底层海水用 0.45 μm 醋酸纤维滤膜过滤后,沿壁缓慢加入到培养管中,避免破坏沉积物的表面状态,每根培养柱加 6.4 L 过滤海水进行现场培养实验.将 PVC 管置于箱中放在暗处进行培养,箱中通循环水,保持培养水温与现场一致.同时以不加

沉积物的过滤海水作为对照实验.以加入海水的时间为起点,按一定的时间间隔(4 ~ 24 h)从培养管中取出海水样品,每次约取 140 mL.培养过程中用多参数仪测定培养管内温度、pH 及溶解氧等参数.整个培养过程约 7 ~ 10 d.培养期间用 Atman II 充气泵搅动以保持培养管内海水混合充分,但搅动速度以不破坏沉积物表层为限.

1.3 样品处理

沉积物培养实验水样经 0.45 μm 醋酸纤维滤膜过滤后分装于聚乙烯瓶中,其中用于测定 PO_4^{3-} -P、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 和 NH_4^+ -N 的水样冷冻保存,测定硅酸盐的样品加入氯化汞常温保存. 5 项营养盐均使用 Technicon™ AA-Ⅲ 自动分析仪(德国布朗卢比公司)测定.

采样站位水体的温度、盐度、溶解氧和营养盐浓度等数据均现场测定. 水体中营养盐浓度用分光光度法测定. 氨氮用次溴酸钠氧化法,硝酸盐用镉铜还

原-偶氮比色法,亚硝酸盐用重氮偶氮比色法,磷酸盐用磷钼蓝法,硅酸盐用硅钼蓝法.

1.4 计算方法

根据测得的上覆水的各项营养盐的浓度和加入培养管中海水的体积计算出某项营养盐在整个培养上覆水体系中的总含量. 然后根据所得的营养盐总含量与培养时间关系图(见图 2),应用连续函数拟和法^[8,9] 计算出沉积物-海水界面的营养盐交换速率.

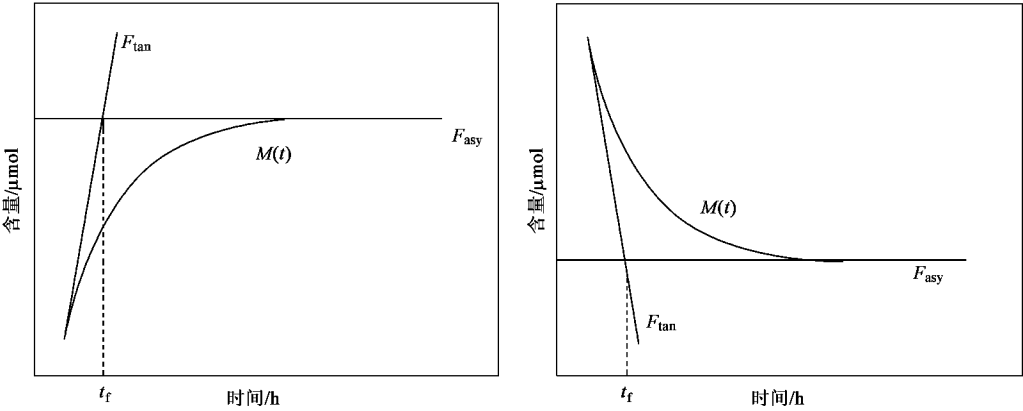


图 2 t_f 的计算示意

Fig.2 Calculation method of t_f

交换速率的微分形式为:

$$v_i = \frac{dM(t)}{A \cdot dt} \tag{1}$$

$M(t)$ 为描述营养盐总含量与时间相关的动力学曲线的函数, v_i 为 t 时刻的即时交换速率, A 为进行培养的沉积物的表面积. 应用中值定理计算其平均值即得平均交换速率 $\bar{v}$:

$$\bar{v} = \frac{1}{t_f - t_0} \int_{t_0}^{t_f} v_i dt = \frac{1}{A \cdot (t_f - t_0)} \cdot \int_{t_0}^{t_f} dM(t) = \frac{1}{A \cdot (t_f - t_0)} M(t) \Big|_{t_0}^{t_f} \tag{2}$$

式中, t_0 和 t_f 分别为交换的起始时刻和最终时刻, 一般情况下 $t_0 = 0$, 此时 $\bar{v}$ 可看作从坐标原点到点 $[t_f, M(t_f)]$ 直线的斜率. 通过对营养盐总含量(M)-培养时间(t)图进行非线性拟合得到某一种函数方程, 取函数 $M(t)$ 在 $t = 0$ 时刻的切线 F_{tan} 和 $t \rightarrow \infty$ 时的渐近线 F_{asy} 的交点对应值作为 t_f . 将 t_0 、 t_f 和 A 值代入上式即可求得交换速率.

2 结果与讨论

2.1 沉积物上覆水的化学环境

沉积物上覆水中的营养盐浓度、pH、溶解氧等如表 1 所示. 硅藻赤潮暴发后, 赤潮暴发区内上覆水中溶解氧、硅酸盐、 NO_3^- -N 的浓度均有明显降低, 磷酸盐浓度略有降低, 而 NO_2^- -N 和 NH_4^+ -N 的浓度则有升高. 4 月下旬已经到了赤潮消亡期, 海域中的赤潮藻类(主要是中肋骨条藻和海链藻)大部分已经死亡, 其残体和其它死亡的浮游生物的有机碎屑在沉降过程中, 蛋白质、多肽、氨基酸等在细菌的作用下发生分解矿化, 转化为 NH_4^+ -N 进入上覆水中, 造成了 NH_4^+ -N 的浓度升高. 整个降解过程为耗氧过程, 由于此时层化已经形成, 因而底层海水中溶解氧浓度降低.

由于该海域硅藻赤潮暴发, 主要吸收 NO_3^- -N、硅酸盐和磷酸盐, 尽管台湾暖流带来高浓度营养盐水(NO_3^- -N 和硅酸盐浓度分别大于 $8 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ 和 $10 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$), 但仍然无法抵消 NO_3^- -N 和硅酸盐的

表 1 沉积物上覆水中 pH、溶解氧及营养盐浓度

Table 1 Value of pH and DO and concentration of nutrients in sediment overlying water

	日期	站位	采样深度/m	pH	DO/mg·dm ⁻³	各项营养盐浓度/μmol·dm ⁻³				
						PO ₄ ³⁻ -P	SiO ₃ ²⁻ -Si	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N
赤潮暴发前	03-27	ZA3	43	8.20	6.01	0.557	21.691	0.400	10.857	0.881
	03-28	ZB12a	54	8.23	5.63	0.505	19.394	0.287	6.127	1.010
	03-28	ZB7	26	8.16	6.32	0.536	27.966	0.712	14.445	1.665
	03-31	ZD21	40	8.22	6.07	0.533	19.063	0.437	13.542	1.347
赤潮暴发后	04-27	Za6a	53	8.10	4.32	0.417	7.572	0.557	8.322	1.374
	04-28	Zb8	27	8.14	5.42	0.435	7.624	0.455	6.813	3.203
	04-29	Zc17	50	8.13	4.01	0.577	10.388	0.583	3.147	3.040
	05-03	Zd21	42	8.11	4.28	0.543	9.774	0.836	5.31	6.608
	05-08	Rb12	50	8.06	4.15	0.513	9.116	0.305	5.835	2.475
	05-09	Hb8	18	7.87	5.50	0.703	16.693	0.318	16.792	2.539

消耗,因而导致 NO₃⁻-N 和硅酸盐浓度的明显降低. 由于台湾暖流中的磷酸盐浓度(大于 0.7 μmol/dm³) 高于赤潮前上覆水中的浓度,所以磷酸盐在底层水中的浓度相对降低较少^[15]. 接近赤潮区的 Rb12 站, 上覆水中化学要素的浓度在赤潮暴发后与赤潮暴发区中的浓度相似,而远离赤潮暴发区的 Hb8 站,在赤潮暴发后,上覆水中各化学要素的浓度与赤潮暴发区海域赤潮暴发前的浓度相似,表明其基本没有受到赤潮暴发的影响.

2.2 沉积物-海水界面营养盐交换速率

根据 1.4 节中的方法,可以计算出营养盐在沉积物-海水界面的交换速率.图 3 以 Zc17 站位为例给出了 SiO₃²⁻-Si、PO₄³⁻-P 和 NO₃⁻-N 在培养体系中的总含量随培养时间的变化.计算得出各站位沉积物-海水界面的营养盐交换速率结果如表 2 所示.

2.2.1 NO₃⁻-N、NO₂⁻-N 和 NH₄⁺-N

由表 1 可知,赤潮暴发前 4 个研究站位上覆水中 NO₃⁻-N 占了无机氮的绝大部分,其比例为 82% ~ 92%,平均 87%;赤潮后的比例降到了 72%,但仍占主要地位,NH₄⁺-N 的比例比赤潮暴发前上升.

对于赤潮区站位,3 月份硅藻赤潮暴发前 NO₃⁻-N都是由海水向沉积物汇聚,其速率变化范围是 -1.33 ~ -0.68 mmol/(m²·d),平均 -0.87 mmol/(m²·d);而 4 月硅藻赤潮暴发后 NO₃⁻-N 由沉积物向海水中释放,变化范围 0.05 ~ 0.82 mmol/(m²·d),平均 0.35 mmol/(m²·d). 接近赤潮区的站位 Rb12 的释放速率 0.26 mmol/(m²·d)与赤潮暴发后的赤潮区站位相近. 远离赤潮区的 Hb8 站位交换速率与赤潮暴发前的赤潮区站位相近,为 -0.69 mmol/(m²·d).可以看出在赤潮暴发前,东海沉积物是 NO₃⁻-N 的汇.赤潮暴发后,赤潮暴发区站位上覆水中的NO₃⁻-N浓度大幅降低,沉积物这时向

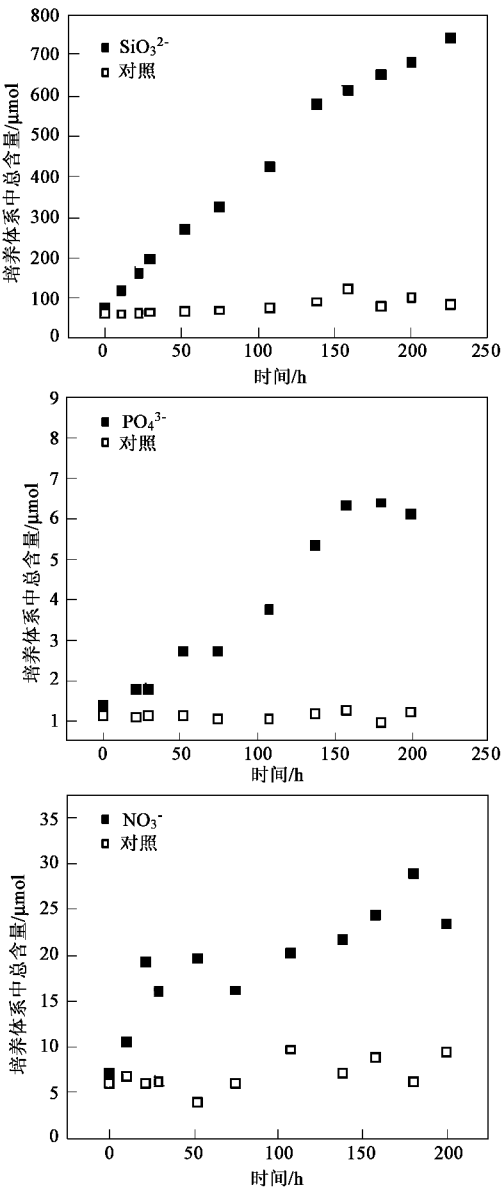


图 3 Zc17 站位 SiO₃²⁻-Si、PO₄³⁻-P、NO₃⁻-N 在培养体系中的总含量随培养时间的变化

Fig.3 Variation of content of SiO₃²⁻-Si, PO₄³⁻-P and NO₃⁻-N with incubation time at Zc17

表 2 各种营养盐在沉积物-海水界面的交换速率
Table 2 Exchange rates of nutrients at the sediment-water interface

赤潮	站位	站位水深/m	采样日期	交换速率/(mmol•(m ² •d) ⁻¹)				
				NH ₄ ⁺ -N	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	PO ₄ ³⁻ -P	SiO ₃ ²⁻ -Si
暴发前	ZA3	46	03-27	1.46	- 0.03	- 1.13	- 0.03	0.85
	ZB12a	57	03-28	1.69	- 0.03	- 0.68	- 0.06	2.32
	ZB7	29	03-28	0.82	- 0.02	- 0.341	- 0.01	1.55
	ZD21	43	03-31	- 0.65	- 0.03	- 1.33	- 0.05	1.16
暴发后	ZA6a	56	04-27	0.98	- 0.03	0.05	0.41	3.31
	Zb8	30	04-28	0.31	- 0.09	0.82	0.08	4.62
	Zc17	53	04-29	0.84	0.05	0.22	0.11	9.23
	Zd21	45	05-03	- 0.45	- 0.11	0.3	1.26	2.74
	Rb12	53	05-08	0.02	- 0.37	0.26	0.03	9.23
	Hb8	21	05-09	- 0.42	- 0.03	- 0.69	0	1.1
平均(赤潮前)				0.83	- 0.03	- 0.87	- 0.04	1.47
平均(赤潮后)				0.42	- 0.04	0.35	0.74	4.98

海水中释放 NO₃⁻ -N,能够补充上层水中由于赤潮藻大量生长消耗的 NO₃⁻ -N.Hb8 站位远离赤潮区,上覆水中 NO₃⁻ -N 浓度为 16.79 μmol/dm³,未受赤潮的影响,为同时期赤潮暴发站位的 3 ~ 4 倍,NO₃⁻ -N 仍然表现为由水体向沉积物中迁移.

赤潮区站位除最南端的 ZD21 外,在赤潮暴发前后 NH₄⁺ -N 都表现为由沉积物向海水中释放.其速率变化范围是:赤潮暴发前 - 0.65 ~ 1.69 mmol/(m²•d),平均 0.83 mmol/(m²•d);赤潮暴发后 - 0.45 ~ 0.98 mmol/(m²•d),平均 0.42 mmol/(m²•d),比赤潮前释放速率降低.Rb12 站的释放速率为 0.02 mmol/(m²•d),远远低于平均值.Hb8 站位的沉积物是 NH₄⁺ -N 的汇,交换速率为 - 0.42 mmol/(m²•d).由表 1 可知,赤潮暴发后上覆水中 NH₄⁺ -N 浓度普遍高于赤潮前,而溶解氧的浓度在赤潮后降低.若不考虑底栖生物在沉积物表层的扰动以及海流引起的沉积物的再悬浮对沉积物-海水界面营养盐的影响,那么 NH₄⁺ -N 在沉积物-海水界面的释放通量由间隙水和上覆水的浓度差、平流作用以及沉积物界面表层固体颗粒的溶解释放组成.一般情况下平流作用 和界面表层颗粒溶解引起的通量都远远小于间隙水扩散引起的通量,可以忽略不计.由于上覆水浓度赤潮后高于赤潮前,所以间隙水与上覆水的浓度差趋向减小,因而沉积物-海水界面 NH₄⁺ -N 总释放速率在赤潮后减小.

NO₂⁻ -N 在赤潮后的底层水的浓度相对于赤潮前浓度升高.在赤潮的前期和后期除 Zc17 外的所有站位都表现为由海水向沉积物中汇聚,赤潮区站位在赤潮暴发前变化范围是 - 0.03 ~ - 0.02 mmol/(m²•d),平均 - 0.03 mmol/(m²•d);赤潮后变化

范围是 - 0.11 ~ 0.05 mmol/(m²•d),平均 - 0.04 mmol/(m²•d),赤潮前后变化不大.Rb12 的 NO₂⁻ -N 向沉积物迁移的速率最大,为 - 0.37 mmol/(m²•d).Hb8 站位同赤潮暴发前的赤潮区速率一样,为 - 0.03 mmol/(m²•d).NO₂⁻ -N 是硝化反硝化过程的中间产物,反应受温度、pH、氧化还原环境、NO₃⁻ -N 和 NH₄⁺ -N 的浓度等多种因素影响,因而其迁移转化机理比较复杂.

2.2.2 PO₄³⁻ -P

赤潮前赤潮区站位的无机磷表现为由海水向沉积物中汇聚,其速率变化范围是 - 0.06 ~ - 0.01 mmol/(m²•d),平均 - 0.04 mmol/(m²•d);赤潮后却表现为由沉积物向海水释放,速率变化范围是 0.08 ~ 1.26 mmol/(m²•d),平均 0.74 mmol/(m²•d).Rb12 站位 PO₄³⁻ -P 的释放速率为 0.03 mmol/(m²•d),低于赤潮区的平均水平;Hb8 站位的交换速率约等于 0.有研究指出,春夏季在长江口邻近海域磷是浮游植物生长的限制因子^[10].由于春季在赤潮暴发前沉积物是 PO₄³⁻ -P 的汇,因而使磷限制的状况加剧,不利于赤潮的暴发.而在硅藻赤潮暴发后,沉积物作为磷的“积蓄库”,在上覆水的无机磷浓度降低时可向水中补充 PO₄³⁻ -P.

2.2.3 SiO₃²⁻ -Si

赤潮前后所有站位的溶解态硅酸盐都表现为由沉积物向海水释放.赤潮前赤潮区为 0.85 ~ 2.32 mmol/(m²•d),平均 1.47 mmol/(m²•d);赤潮后为 2.74 ~ 9.23 mmol/(m²•d),平均 4.98 mmol/(m²•d),高于赤潮前.Rb12 站位的释放速率为 9.23 mmol/(m²•d),高于赤潮区的平均值.Hb8 站位的释放速率为 1.1 mmol/(m²•d),与赤潮前赤潮区平均释

放速率相近. 由于 4 月上旬大规模硅藻赤潮的暴发, 使海水中硅的浓度大幅下降, 除 Hb8 站位外大部分站位都下降了 1/2 以上. 硅酸盐在沉积物-海水界面的交换速率主要由间隙水和上覆水的浓度差以及表层沉积物中的粘土矿物的溶解扩散控制. 当底层水的无机硅酸盐浓度降低, 间隙水和上覆水的浓度差趋向增大并且加速了表层粘土矿物的溶解释放, 因而硅的释放速率增大. 硅藻死亡后, 细胞壁中所含的生物硅绝大部分在沉积过程中溶解了, 最终约有总量的 3% 被埋藏保存于沉积物中^[16]. 硅藻细胞中生物硅的溶解释放也是赤潮后无机硅释放速率增大的主要原因之一. 台湾暖流使底层水温度上升, 进一步加速了扩散和溶解的进行.

2.3 同其它海域交换速率的比较

根据表 3, SiO_3^{2-} -Si 的交换速率在硅藻赤潮暴发前与大亚湾接近, 约为黑海西北部的 2 倍. 硅藻赤潮暴发后同胶州湾和旧金山湾相近, 处于中等偏上水

平. 这可能由于所采集的站点都位于东海近岸大陆架, 沉积物多为泥质和粉砂质, 富含粘土矿物, 有利于硅酸盐的释放. PO_4^{3-} -P 的交换速率在硅藻赤潮前后表现出完全不同的趋势. 硅藻赤潮暴发前与其他大部分已调查海域的沉积物为 PO_4^{3-} -P 的源不同, 东海调查海域的沉积物是 PO_4^{3-} -P 的汇. 磷在硅藻赤潮暴发后的释放速率与大部分海域相比较高. NH_4^+ -N 的交换速率在硅藻赤潮暴发前后都低于莱州湾, 处于我国其他海域的变化范围内. NO_3^- -N 的交换速率在硅藻赤潮暴发前与石峰在 2002 年春季的实验结果接近, 表现为由海水向沉积物汇聚. 硅藻赤潮暴发后的释放速率高于大亚湾, 约为亚得里亚海陆架区北部值的一半. 从表中可以看出, 宋金明于 1987 年在东海长江口外测得的营养盐交换速率与本次调查结果相比小 1 个数量级, 这可能是由于其所用的间隙水浓度梯度估算法与本实验方法不同造成的.

表 3 其它海域营养盐在沉积物-海水界面的交换速率/ $\text{mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$

海区	SiO_3^{2-} -Si	PO_4^{3-} -P	NH_4^+ -N	NO_3^- -N	资料来源
莱州湾	—	—	0.96 ~ 2.52	0.038 ~ 3.65	[3]
东海(长江口外)	0.047 6 ~ 0.149	(-0.274 ~ -0.001) $\cdot 10^{-3}$	-0.034 ~ 0.014	—	[5]
南沙海域	0.082 ~ 3.144	—	—	—	[5]
大亚湾	0.5 ~ 1.5	0.007 ~ 0.015	0.17 ~ 0.94	0.022 ~ 0.059	[6]
胶州湾	3.3	0.1 ~ 90	-0.41 ~ 1.6	-0.2 ~ 2.8	[8]
东海(春夏)	0.39 ~ 25.4	-0.01	-7.36 ~ 2.348	-1.05 ~ 0	[9]
英国 Narragansett 湾	1 ~ 12	0.1 ~ 5.6	1.8 ~ 12	—	[17]
长江口	0.13 ~ 13.2	—	-2.6 ~ 3.4	-1.4 ~ 3.2	[18]
旧金山湾	4.5	0.2	—	—	[19]
东太平洋陆架	15.4	0 ~ 0.2	—	—	[20]
黑海西北部	0.6	0.05	—	—	[21]
新西兰南部岛屿	—	—	0.1 ~ 0.7	0.1 ~ 0.6	[22]
澳大利亚 Bowling Green 湾	—	—	-0.16 ~ 0.76	-0.008 5 ~ 0.18	[23]
亚得里亚海陆架区北部	—	—	2.69	0.71	[24]
本研究	0.85 ~ 9.23	-0.065 ~ 1.26	-0.65 ~ 1.69	-1.33 ~ 0.82	

2.4 赤潮前后营养盐的通量

根据站位图方框内的面积约 2 万 km^2 , 可以计算出 SiO_3^{2-} -Si、 PO_4^{3-} -P 和 NO_3^- -N 在本次调查海域硅藻赤潮暴发前后的通量. 表 4 为赤潮前后营养盐交

换通量与东海其他输入的比较.

长江的年径流量高达 9 240 亿 m^3 , 富含营养盐, 然而 80% 集中在夏季的丰水期, 春秋 2 季流量较小^[4]. SiO_3^{2-} -Si 在调查海域赤潮前的释放通量约为长江输入的 13.5%, 赤潮后增加为 44.6%, 为上覆水体补充了大量的活性硅酸盐. 本研究的计算结果再次证明沉积物是海水中活性硅酸盐输入的重要途径. PO_4^{3-} -P 在硅藻赤潮暴发前从水体向沉积物中转移, 沉积物在赤潮暴发前并不向水体提供无机磷. 但是 PO_4^{3-} -P 在硅藻赤潮暴发后变化为由沉积物向海水中大量输送, 输入量约为同时期长江输入的 11

表 4 东海营养盐各输入来源的通量/ $\text{mmol} \cdot \text{d}^{-1}$

Table 4 Fluxes of nutrients of the other sources in the East China Sea/ $\text{mmol} \cdot \text{d}^{-1}$

营养盐输入来源	SiO_3^{2-} -Si	PO_4^{3-} -P	NO_3^- -N	资料来源
沉积物释放(赤潮前)	2.94×10^{10}	-8.00×10^8	-1.74×10^{10}	
沉积物释放(赤潮后)	9.96×10^{10}	1.48×10^{10}	7.00×10^9	
长江输入	2.17×10^{11}	1.34×10^9	1.35×10^{11}	[12]
大气湿沉降	1.23×10^8	1.62×10^6	0.73×10^9	[25]

倍,因此对 PO_4^{3-} -P 的补充具有重大的贡献.东海近岸水体中的 PO_4^{3-} -P,在春夏季赤潮过程中,表层和中层水的浓度迅速从 $0.6\ \mu\text{mol/L}$ 左右降低到小于 $0.1\ \mu\text{mol/L}$,而底层水一直保持在 $0.6\ \mu\text{mol/L}$ 左右的高浓度,因此硅藻赤潮后沉积物的释放可能是东海调查海域底层水 PO_4^{3-} -P 浓度在春夏季一直保持在较高浓度的主要原因之一. NO_3^- -N 在硅藻赤潮暴发前从水体向沉积物中转移,赤潮暴发后则从沉积物向水体中释放,释放通量约为长江输入的 5.2%,大气湿沉降的 9.6 倍.

在 4 月中旬硅藻赤潮消散后,同一海域于 5 月下旬至 6 月中旬又暴发了米氏凯伦藻和东海原甲藻的赤潮,面积约 $15\ 000\ \text{km}^2$. PO_4^{3-} -P 及 NO_3^- -N 在 4 月硅藻赤潮暴发后由沉积物向海水中的大量释放,为后面紧接的大面积甲藻赤潮的暴发提供了重要的营养物质补充.

3 结 论

(1) SiO_3^{2-} -Si 在硅藻赤潮暴发前后均向水体中释放,赤潮后的释放速率比赤潮前增加.

(2) NH_4^+ -N 在赤潮前后大都从沉积物中释放,赤潮后释放速率小于赤潮前. NO_2^- -N 赤潮前后大都向沉积物中汇聚,赤潮后汇聚速率稍高.

(3) NO_3^- -N 和 PO_4^{3-} -P 均是在赤潮前向沉积物中汇聚,赤潮后却由沉积物向海水中释放.由于春季在赤潮暴发前 PO_4^{3-} -P 向沉积物汇聚,使磷限制的状况加剧,所以东海近海沉积物在春季不利于赤潮的暴发.而 PO_4^{3-} -P 及 NO_3^- -N 在 4 月硅藻赤潮暴发后从沉积物向海水中的大量释放则可能为后面紧接的大面积甲藻赤潮的暴发提供了重要营养补充.

参考文献:

[1] Zabel M, Dahmke A, Schulz H D. Regional distribution of diffusive phosphate and silicate fluxes through the sediment-water interface the eastern South Atlantic [J]. Deep-Sea Research I, 1998, **45**: 227 ~ 300.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 刘素美, 张经, 陈洪涛. 黄海和东海生源要素的化学海洋学 [J]. 海洋环境科学, 2000, **19**(1): 68 ~ 75.

[5] 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.

[6] 顾德宇, 汤荣坤, 余群. 大亚湾沉积物间隙水的无机磷硅氮营养盐化学[J]. 海洋学报, 1995, **17**(5): 73 ~ 80.

[7] 郭劳动, 洪华生, 庄继浩. 闽东罗源湾沉积物-水界面磷、硅的交换[J]. 热带海洋, 1989, **8**(3): 60 ~ 66.

[8] 蒋凤华, 王修林, 石晓勇, 等. 营养盐在胶州湾沉积物-海水界面上的交换速率和通量研究[D]. 青岛: 青岛海洋大学, 2002.

[9] 石峰, 王修林, 石晓勇, 等. 东海沉积物-海水界面营养盐交换通量的初步研究[J]. 海洋环境科学, 2004, **23**(1): 5 ~ 8.

[10] 蒲新明, 吴玉霖, 张永山. 长江口区浮游植物营养限制因子的研究[J]. 海洋学报, 2001, **23**(3): 57 ~ 66.

[11] 王保栋, 战闰, 藏家业. 长江口及其邻近海域营养盐的分布特征和输送途径[J]. 海洋学报, 2002, **24**(1): 53 ~ 58.

[12] 沈志良. 三峡工程对长江口及附近海域营养盐分布变化影响的研究[J]. 海洋与湖沼, 1991, **22**(6): 540 ~ 546.

[13] 张启龙, 王凡. 舟山渔场及其临近海域水团的气候学分析 [J]. 海洋与湖沼, 1991, **35**(1): 48 ~ 54.

[14] 郭志刚, 杨作升, 曲艳慧, 等. 东海陆架泥质区沉积地球化学比较研究[J]. 沉积学报, 2000, **18**(2): 284 ~ 289.

[15] 张伟. 东海营养盐分布及胶州湾底质无机氮动力学研究 [D]. 青岛: 青岛海洋大学, 1996.

[16] Treguer P, Nelson D M, Van Bennekom A J, *et al.* The silica balance in the world ocean: a reestimate [J]. Science, 1995, **268**: 375 ~ 379.

[17] Elderfield H, Luedtke N, McCaffrey R J, *et al.* Benthic flux studies in Narragansett Bay [J]. American Journal of Science, 1981, **281**: 768 ~ 787.

[18] 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.

[19] Cocicsu A, Dorogan L, Humborg C, *et al.* Long term ecological changes in the Black Sea [J]. Mar Pollute Bull, 1996, **32**: 32 ~ 38.

[20] Gomoiu M T. Marine eutrophication syndrome in the northwestern part of the Black Sea [J]. Marine Coastal Eutrophication, 1992 (Supplement): 683 ~ 692.

[21] Friedl G, Dinkel C, Wehrli B. Benthic fluxes of nutrients in the northwestern Black Sea [J]. Mar Chem, 1998, **62**: 77 ~ 88.

[22] Kaspar H F, Asher R A, Boyer I C. Microbial Nitrogen Transformations in Sediments and Inorganic Nitrogen Fluxes Across the Sediment/Water Interface on the South Island West Coast, New Zealand [J]. Estuarine, Coastal and Science, 1985, **21**: 245 ~ 255.

[23] Ullman W J, Sandstrom M W. Dissolved Nutrient Fluxes from the near shore Sediments of Bowling Green Bay, Central Great Barrier Reef Lagoon (Australia) [J]. Estuarine, Coastal and Science, 1987, **24**: 289 ~ 303.

[24] Spagnoli F, Bergamini M C. Water-sediment exchange of nutrients during early diagenesis and resuspension of anoxic sediments from the Northern Adriatic Sea shelf [J]. Water, Air and Soil Pollution, 1997, **99**: 541 ~ 556.

[25] 张国森, 陈洪涛, 张经, 等. 长江口地区大气湿沉降中营养盐的初步研究[J]. 应用生态学报 2003, **14**(7): 1107 ~ 1111.