

# 黄河三角洲潮间带营养盐的输送通量研究

张 鹏<sup>1</sup>, 邹 立<sup>1,2</sup>, 姚 晓<sup>1</sup>, 郭新宇<sup>3</sup>, 高会旺<sup>1,2</sup>, 山口一岩<sup>3</sup>

(1 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100 2 中国海洋大学 海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100 3 日本爱媛大学 海洋环境研究中心, 日本 松山 7908577)

**摘 要:** 为研究潮间带区域营养盐的时空变化特点和输送通量, 于 2007 年 9 月、2008 年 4 月和 2008 年 7 月在黄河三角洲南部潮间带设置三个 15 h 连续站, 监测溶解  $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{SiO}_3\text{-S}$  以及溶解总氮 (DTN) 和溶解总磷 (DTP) 含量。结果表明: (1) 秋、春和夏季 DTN 的浓度范围分别为 27.55~88.53  $\mu\text{mol/L}$  (平均为 57.79  $\mu\text{mol/L}$ )、96.00~249.75  $\mu\text{mol/L}$  (平均为 168.65  $\mu\text{mol/L}$ ) 和 92.97~265.33  $\mu\text{mol/L}$  (平均为 173.00  $\mu\text{mol/L}$ ); DTP 的浓度范围分别为 0.22~3.14  $\mu\text{mol/L}$  (平均为 1.05  $\mu\text{mol/L}$ )、1.04~5.27  $\mu\text{mol/L}$  (平均为 2.41  $\mu\text{mol/L}$ ) 和 1.40~8.03  $\mu\text{mol/L}$  (平均为 4.60  $\mu\text{mol/L}$ )。 (2) 该潮间带区域 N 主要来自陆源输入; 秋季 DIP 和 DTP 与陆源输入有关, 而春季和夏季主要来自沉积物的释放; DISi 来自陆源输入。 (3) 计算表明, 该区域对开放海域水体的营养盐输送量 (DN 为  $15.70 \times 10^7 \mu\text{mol/m}^2$ , DIP 为  $0.46 \times 10^7 \mu\text{mol/m}^2$ ) 远大于沉积物对水体的营养盐补充 (DN 为  $6415.36 \mu\text{mol/m}^2$ , DIP 为  $5.28 \mu\text{mol/m}^2$ ) 和浮游植物的对营养盐的吸收 (DN 为  $5235.13 \mu\text{mol/m}^2$ , DIP 为  $147.77 \mu\text{mol/m}^2$ )。

**关键词:** 黄河三角洲; 潮间带; 营养盐; 通量

中图分类号: X834 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2011)01-0076-05

## Transportation fluxes of nutrients in intertidal area of Yellow River Delta

ZHANG Peng<sup>1</sup>, ZOU Li<sup>1,2</sup>, YAO Xiao<sup>1</sup>, GUO Xin-yu<sup>3</sup>, GAO Hui-wang<sup>1,2</sup>, YAMAGUCHI Hitom<sup>3</sup>

(1 College of Environmental Science and Engineering Ocean University of China Qingdao 266100 China 2 Key Laboratory of Marine Environment & Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China Qingdao 266100, China 3 Center for Marine Environment Studies (CMES), Ehime University, Matsuyama 7908577, Japan)

**Abstract** In order to address the seasonal and tidal variations and transportation fluxes of nutrients in the intertidal area of the Yellow River Delta  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$ ,  $\text{SiO}_3\text{-S}$ , DTN and DTP nutrients in the seawaters were collected and analyzed in Sep 2007, Apr 2008 and Jul 2008 by the anchor monitoring respectively. The results showed that DTN was 27.55~88.53  $\mu\text{mol/L}$  (averaged at 57.79  $\mu\text{mol/L}$ ), 96.00~249.75  $\mu\text{mol/L}$  (averaged at 168.65  $\mu\text{mol/L}$ ) and 92.97~265.33  $\mu\text{mol/L}$  (averaged at 173.00  $\mu\text{mol/L}$ ) in autumn, spring and summer correspondingly. DTP was 0.22~3.14  $\mu\text{mol/L}$  (averaged at 1.05  $\mu\text{mol/L}$ ), 1.04~5.27  $\mu\text{mol/L}$  (averaged at 2.41  $\mu\text{mol/L}$ ) and 1.40~8.03  $\mu\text{mol/L}$  (averaged at 4.60  $\mu\text{mol/L}$ ), respectively. It was suggested that DN, DTN and DISi in this intertidal area primarily originated from the terrigenous input while DIP and DTP originated from the terrigenous input in autumn but contributed by the releasing from sediment in spring and summer. It was estimated that the average annual fluxes of nutrients from the intertidal area to open waters were much higher than that from sediments to overlying waters and absorbed by the phytoplankton.

**Key words** Yellow River Delta; intertidal area; nutrients; flux

营养盐作为海洋生物生存的必需元素, 其分布、变化和输送通量不仅直接影响到海洋生产力和资源的变动, 而且可以反映海洋环境污染的程度、生态变化的状况, 对

其分布和变化规律的研究是当前海洋生态、环境和渔业资源研究的基础。海湾河口地区处于陆地和海洋交界, 海陆相互作用活跃, 受人为因素影响大, 对这些地区营养

收稿日期: 2009-06-16; 修订日期: 2009-09-11

基金项目: 国家自然科学基金委对外合作与交流项目 (40711140114)

作者简介: 张鹏 (1984-), 男, 山东省潍坊市人, 硕士研究生, 研究方向为环境化学, Email: bandao20@ouc.edu.cn

通讯作者: 邹立

盐分布、变化及通量的研究显得尤为重要<sup>[1-7]</sup>。

潮间带营养盐的输送主要有河流输入、降雨、与开放海域水体的交换、沉积物与水体营养盐的交换等途径。在沿岸、河口及陆架区域, 河流输入和沿岸的污水排放占营养盐输入的绝大部分, 并通过潮汐、风、对流扩散等作用进行影响。海水与开放海域海水之间的交换, 是营养盐的另一个重要来源, 在水交换不受限制的水域尤为重要, 而在水交换受限制的水域则主要受到陆源输入影响<sup>[8-10]</sup>。沉积物-海水之间的交换是水体中有机物和无机营养盐来源和去向的重要过程之一, 在浅海海域, 当外部的营养盐输入减少时, 从沉积物释放的营养盐可成为满足生产力需要的重要因子, 甚至有研究者发现沉积物-海水界面上“各种形态 N 的通量要比河流输入高 10 倍”, 因而沉积物-海水之间的交换过程是近海生态系统所不可缺少的一部分<sup>[11]</sup>。由于环境条件多样, 变化速度快程度高, 对潮间带区域营养盐输送和来源的定量化研究较为困难。

黄河三角洲位于渤海西南部, 莱州湾的西部, 由黄河入海冲积而成。黄河入海口西南部潮滩, 有广利河、小清河和淄脉沟注入, 底质属于典型的沙质; 当地潮滩的功能主要为双壳类(四角蛤蜊)和单壳类(泥螺)贝类养殖。底栖贝类主要以微藻为食, 微藻的生物量和生产力以营养盐等为物质基础。本文通过在潮间带区域三个季节(秋季、春季和夏季)的连续站调查, 研究该潮滩营养盐的输送特征, 探讨潮涂营养盐的主要来源和传输过程, 估算潮间带营养盐的输送通量。所得结果是正确预测区域初级和次级生产力的主要参数, 为潮间带的合理利用和可持续发展提供理论依据。

## 1 调查区域和实验方法

### 1.1 站位设置

连续站监测和样品采集进行于 2007 年 9 月、2008 年 4 月 2008 年 7 月, 分别代表秋季、春季和夏季。调查区域位于黄河入海口西南部, 莱州湾西部, 主要汇入河流有永丰河、淄脉河和穿过东营的广利河。站位设置如图 1 所示, 从北向南共设 3 个连续站, 分别记为 A、B、C 点, 共进行 15 h 的连续监测, 每半小时采样一次, 同时验潮和测流。

验潮和水体的温度、盐度的数据由加拿大 RBR 公司生产的 XR-420 CTD 温盐深仪和 TWR-2050 波潮仪测定; 海流数据由日本 ALEC 公司生产的 COMPACT-EM 小型电磁式海流计测定。连续站监测时波潮仪和海流计捆绑在铁杆上插入潮间带近底处连续读取数据; 温盐深仪每半小时采样时将其放入水中读取数据。

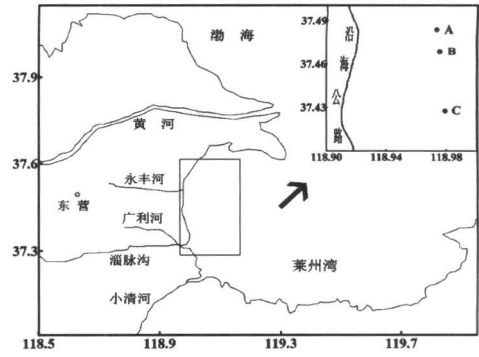


图 1 黄河三角洲潮间带连续站调查站位

Fig 1 Anchor stations in the intertidal area of the Yellow River Delta

### 1.2 营养盐分析

采集的营养盐样品经过滤 ( $0.45 \mu\text{m}$ ) 后, 以  $\text{CHCl}_3$  固定冷冻保存。

营养盐采用营养盐自动分析仪(德国 Bran Luebbe 公司, AA3 型号)测定。分析方法原理如下:  $\text{NO}_3^-$ -N 为镉铜还原-重氮偶氮法,  $\text{NO}_2^-$ -N 为重氮偶氮法,  $\text{NH}_4^+$ -N 为靛酚蓝法,  $\text{PO}_4^{3-}$ -P, DIP 为磷钼蓝法,  $\text{SiO}_4^{2-}$ -Si 为硅钼蓝法, 溶解总氮(DTN)和溶解总磷(DTP)为过硫酸钾氧化法<sup>[12]</sup>。各项溶解  $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 之和为 DN, 溶解有机氮(DON)为 DTN 与 DN 之差, 溶解有机磷(DOP)为 DTP 与 DIP 之差。

## 2 结果与讨论

### 2.1 黄河三角洲南部潮间带水体营养盐的不同季节一个潮周期的变化

秋、春和夏季一个潮周期内 DTN 的浓度范围分别为  $27.55 \sim 88.53 \mu\text{mol/L}$ (平均值为  $57.79 \mu\text{mol/L}$ )、 $96.00 \sim 249.75 \mu\text{mol/L}$ (平均值为  $168.65 \mu\text{mol/L}$ )和  $92.97 \sim 265.33 \mu\text{mol/L}$ (平均值为  $173.00 \mu\text{mol/L}$ ); DN 的浓度范围分别为  $8.86 \sim 85.82 \mu\text{mol/L}$ (平均值为  $34.93 \mu\text{mol/L}$ )、 $70.56 \sim 235.09 \mu\text{mol/L}$ (平均值为  $140.74 \mu\text{mol/L}$ )和  $64.08 \sim 152.17 \mu\text{mol/L}$ (平均值为  $101.12 \mu\text{mol/L}$ ); DTP 的浓度范围分别为  $0.22 \sim 3.14 \mu\text{mol/L}$ (平均值为  $1.05 \mu\text{mol/L}$ )、 $1.04 \sim 5.27 \mu\text{mol/L}$ (平均值为  $2.41 \mu\text{mol/L}$ )和  $1.40 \sim 8.03 \mu\text{mol/L}$ (平均值为  $4.60 \mu\text{mol/L}$ ); DIP 的浓度范围分别为  $0.03 \sim 0.67 \mu\text{mol/L}$ (平均值为  $0.21 \mu\text{mol/L}$ )、 $0.12 \sim 0.83 \mu\text{mol/L}$ (平均值为  $0.45 \mu\text{mol/L}$ )和  $1.12 \sim 5.31 \mu\text{mol/L}$ (平均值为  $2.52 \mu\text{mol/L}$ ); 秋季和夏季 DISi 的浓度范围分别为  $5.78 \sim 21.19 \mu\text{mol/L}$ (平均值为  $13.97 \mu\text{mol/L}$ )和  $79.84 \sim 310.44 \mu\text{mol/L}$ (平均值为  $119.43 \mu\text{mol/L}$ )。

### 2.2 潮间带水体温度、盐度和营养盐的季节变化

分别对各航次各断面各参数一个连续站周期内的数据做平均, 即得到表 1 的结果。水体的温度、盐度、N、P 和 Si 营养盐都很好的显示出季节的特点: 夏季航次水体温

度最高,一个潮周期内平均达到了 28.08℃,秋季航次比春季航次高了 2.08℃;水体的盐度在夏季航次最低,一个潮周期内平均为 24.69,春季航次次之(25.16),这是由于该潮间带区域西部有多条河流输入,进入 4 月份,该区域随着降雨的增多,河流径流量渐渐增加,河水对海水的冲淡作用渐渐增强,夏季为全年的雨季,河流径流量达到全年最高,从而河水对海水的冲淡作用也达到全年最大,故夏季航次水体盐度最低,春季航次水体盐度高于夏季航次。N、P 和 Si 营养盐同样显示出明显的河流入海径流量对该区域水体的影响。虽然每年的 4~9 月为营养盐

的消耗期,10 月~次年 3 月为营养盐的补充期,但由于有河流输入,春季和夏季河流径流量较大,大的入海通量带来大量的营养盐,因而在春季和夏季营养盐被大量消耗的同时,又有大量的营养盐通过河流被源源不断的补充进来,故春季和夏季航次, N、P 和 Si 营养盐都保持在较高的浓度,远远高于秋季航次。同期调查的水体叶绿素 a 数据与营养盐季节变化规律相一致,夏季航次最高(7.50 μg/L),春季航次次之(6.00 μg/L),秋季航次最低(3.22 μg/L)。

表 1 秋、春和夏季黄河三角洲南部潮间带水体营养盐连续监测结果平均值

Tab. 1 Average values of continuous monitoring results of nutrients in water in southern intertidal area of Yellow River Delta in autumn, spring and summer

采样时间	断面	t / °C	S	c / μmol · L <sup>-1</sup>				
				DTN	DN	DTP	DIP	DISi
2007 年 9 月	A	19.08	26.20	58.12	51.24	0.96	0.20	14.12
	B	18.85	26.56	60.26	26.81	1.25	0.26	14.30
	C	18.92	26.41	54.99	26.74	0.95	0.17	13.49
	平均	18.95	26.39	57.79	34.93	1.05	0.21	13.97
2008 年 4 月	A	16.94	25.22	162.14	127.45	2.44	0.40	
	B	17.08	25.59	158.02	127.92	2.08	0.40	
	C	16.59	24.67	185.79	166.85	2.70	0.55	
	平均	16.87	25.16	168.65	140.74	2.41	0.45	
2008 年 7 月	A	28.10	23.77	145.20	96.31	3.28	1.96	100.07
	B	27.88	25.52	163.83	88.13	4.48	2.15	109.70
	C	28.25	24.77	209.96	118.91	6.04	3.44	148.53
	平均	28.08	24.69	173.00	101.12	4.60	2.52	119.43

### 2.3 潮间带水体营养盐与潮汐相关性分析

为揭示一个潮周期内,各营养盐指标随潮汐变化的规律及其相互关系,进而指示该潮间带地区的海源输入

和陆源输入,做了三个航次 A、B、C 断面一个连续站周期内水体营养盐与潮汐相关性分析,得到表 2 的结果。

表 2 一个连续站周期内水体营养盐与潮汐相关性分析

Tab. 2 Analysis of correlation of nutrients and tidal cycle in a continual station cycle

表 2-1 2008 年 4 月航次 C 断面

	Depth	DTN	DN	DTP	DIP
Depth	1				
DTN	-0.607*	1			
DN	-0.686*	0.938**	1		
DTP	0.298	-0.008	-0.069	1	
DIP	0.663*	-0.337	-0.422*	0.601**	1

表 2-2 2008 年 7 月航次 A 断面

	Depth	DTN	DN	DTP	DIP	DISi
Depth	1					
DTN	-0.711**	1				
DN	-0.867**	0.625**	1			
DTP	0.406*	0.191	-0.369	1		
DIP	0.796**	-0.156	-0.501**	0.593**	1	
DISi	-0.733**	0.703**	0.656**	0.006	-0.320	1

注: \* 表示显著相关,置信度 < 0.05; \*\* 表示极显著相关,置信度 < 0.01,下同。

秋季航次 A、C 断面, DISi 浓度与潮汐显示出极显著的负相关关系,表明该区域 DISi 来自陆源输入,随着涨潮和落潮, DISi 浓度随之降低和上升。A 断面 DIP 浓度和 C 断面 DTP 浓度与潮汐显示出显著的负相关关系,表明该

区域 A 断面 DIP 和 C 断面 DTP 亦与陆源输入有关。另外, A、C 断面 DTN 与 DN 均显示出极显著的正相关关系,表明其 DTN 与 DN 具有同源性。

春季航次 A、B、C 断面, DIP 浓度与潮汐显示出显著与

极显著的正相关关系,即随着涨潮潮落, DIP 浓度随之上升和下降。这可能是因为 DIP 主要来自沉积物和水体悬浮物的释放, DIP 浓度达到最高时水体的温度较低,而盐度几乎是最高。水体温度的降低、盐度的升高会抑制水体悬浮物对磷酸盐的吸附<sup>[13]</sup>。换言之,当潮水急涨和近乎达到高潮时,对沉积物表层的搅动,使得沉积物对 DIP 释放和水体中悬浮物增加,而此期间水体的温度较低,盐度在升高,水体中大量的悬浮物对磷酸盐进行了释放,故此期间水体的 DIP 浓度较高,本文所得结论与该结论相一致。A 断面 DIN 浓度与潮汐、C 断面 DTN 和 DIN 的浓度与潮汐显示为显著和极显著的负相关关系,表明该区域 A、C 断面 N 的输入与陆源有关。另外, A 断面 DTN 与 DIN, C 断面 DTN 与 DIN, DTP 与 DIP, B 断面 DTN 与 DTP, DTN 与 DIN 都显示出极显著和显著的正相关关系,表明其 DTN 与 DIN, DTP 与 DIP, DTN 与 DTP 具有同源性。

夏季航次 A、B、C 断面 DTN、DIN 和 DSi 浓度都与潮汐显示出极显著的负相关关系,表明其来自陆源输入。A 断面 DIP 和 DTP, B 断面 DIP 都与潮汐显示出极显著和显著的正相关关系,表明其与水体对沉积物表层的搅动而引起的释放有关。A、B、C 断面 DTN 与 DIN 和 DSi, DIN 和 DSi, DTP 和 DIP 都显示出极显著的正相关关系,表明其具有同源性。

综上所述,该区域潮间带 N 主要来自陆源输入。秋季航次的调查表明该区域 DIP 和 DTP 亦与陆源输入有关,而春季航次和夏季航次的调查表明该潮间带区域 P

主要来自水体对沉积物表层的搅动而引起的释放, DSi 来自陆源输入。

### 2.4 黄河三角洲南部潮间带水体中营养盐交换通量研究

#### 2.4.1 潮间带与开放海水在一个潮周期内的营养盐交换通量

研究区域属于不正规的混合半日潮,其潮汐主要受黄河口外半日无潮点的影响,也受渤海海峡日潮无潮点的影响。受莱州湾环流和风生环流的影响,该区域常年存在着沿岸往复流;受地形的影响,该区域一般是涨潮流速稍小于落潮流速<sup>[14]</sup>。

通过东营黄河三角洲潮间带秋季、春季和夏季航次三个连续站调查,获得了海流和营养盐浓度的数据,根据下式估算一个断面一个潮周期内开放海域水体对该区域营养盐的输送通量。

$$W_l = \sum 10 \cdot c_k \cdot v_k \cdot t \quad (1)$$

式中:  $W_l$  为  $l$  断面开放海域水体与潮间带之间的营养盐输送通量 ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ );  $c_k$  为连续站第  $k$  个时间段营养盐的浓度 ( $\mu\text{mol}/\text{L}^3$ );  $v_k$  为连续站第  $k$  个时间段内的平均流速 ( $\text{cm}/\text{s}$ );  $k$  的取值为  $1 \sim 30$   $t$  为每个连续站的时间间隔,  $t = 1800 \text{ s}$  三个断面计算的营养盐通量的数据相加,  $W = \sum W_l$ , 其中  $l$  取 A、B 和 C, 即得到整个潮间带一个潮周期内开放海域水体对该区域营养盐的输送通量。计算结果见表 3。

表 3 一个潮周期内开放海域水体对黄河三角洲潮间带营养盐的输送通量

Tab 3 Nutrients flux to intertidal area of Yellow River Delta from open seawater in a tidal cycle

季节	$w / 10^7 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$				
	DIN	DTN	DIP	DTP	DSi
秋季	-4.36	-7.59	-0.03	-0.21	-2.02
春季	-6.76	2.93	0.01	0.20	
夏季	15.70	24.11	0.46	0.80	10.47

注: 正数表示营养盐由潮间带向开放海域水体输送, 负数表示营养盐由开放海域水体向潮间带输送。

表 3 表明, 春季一个潮周期内, DIN 表现为由开放海域水体向潮间带输送, DTN、DIP 和 DTP 均表现为由潮间带向开放海域水体输送; 夏季一个潮周期内 DIN、DTN、DIP、DTP 和 DSi 均表现为由潮间带向开放海域水体输送, 且输送的量远远高于春季航次。DIN 由春季向潮间带输入变为夏季由潮间带输出, 由潮间带输出的 DTN 夏季是春季的 8 倍, 由潮间带输出的 DIP 夏季是春季的 46 倍, 由潮间带输出的 DTP 夏季是春季的 4 倍。这是因为春季正值潮间带营养盐的补充期, 在此期间生物繁殖需消耗部分营养盐。而春未夏初潮间带生物量达到一年中的顶峰, 虽然营养盐被大量的消耗, 但由于有河流输入, 大的入海通量带来大量的营养盐, 在夏季营养盐被大量消耗的同时, 又有大量的营养盐通过河流被源源不断的补充进来, 除满足生物需求外还向开放海域水体输送, 故夏季营养盐由潮间带向开放海域水体输送的量较春季高了很多。

#### 2.4.2 沉积物-水界面的营养盐输送通量

潮间带沉积物-水界面营养盐的交换主要有两种模式<sup>[15]</sup>, 一种是静态下的浓度分子扩散, 另一种是动力扰动状态下的湍流扩散。

关于第一种模式引起的营养盐扩散通量可以应用 Fick 第二定律计算得出<sup>[16]</sup>:

$$F_s = D_s \Phi \frac{\partial C}{\partial Z} \quad (2)$$

其中:  $F_s$  为营养盐交换通量 [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ];  $\Phi$  为沉积物的孔隙度, 参考河口沉积物有关参数, 估计该区域  $\Phi$  平均为  $0.70^{[21]}$ ;  $D_s$  为沉积物中分子扩散系数 ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ), 当  $\Phi \leq 0.7$  时,  $D_s = \Phi D_0$  当  $\Phi > 0.7$  时,  $D_s = \Phi^2 D_0$ , 式中  $D_0$  为理想溶液的扩散系数, 温度  $25^\circ\text{C}$  时  $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$  的理想扩散系数分别为  $19.1 \times 10^{-6}$ 、 $19.0 \times 10^{-6}$ 、 $19.8 \times 10^{-6}$ 、 $7.34 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$   $\frac{\partial C}{\partial Z}$  为沉积物-水界面扩

散边界层营养盐浓度梯度,这里认为它是线性的。

关于第二种模式引起的营养盐扩散通量,主要是通过影响水体和沉积物之间的扩散边界层厚度来影响其扩散通量。目前并没有确切的公式或模型可以确切描述动力扰动状态下水体和沉积物之间扩散边界层厚度的变化,因而只要确定此扩散边界层厚度,就可以通过 Fick 第二定律确定潮间带沉积物-水界面营养盐的交换通量。为此本文中我们将扩散边界层的厚度取一个经验值  $Z = 0.5 \text{ mm}^{[17]}$ 。

经计算沉积物-水体界面营养盐的扩散以 N 为主,其中  $\text{NH}_4\text{-N}$  由沉积物向上覆水输送,输送通量为  $8558.56 \mu\text{mol/m}^2$ ;  $\text{NO}_3\text{-N}$  和  $\text{NO}_2\text{-N}$  均为由上覆水向沉积物输送,输送通量分别为  $1774.47 \mu\text{mol/m}^2$  和  $368.73 \mu\text{mol/m}^2$ 。由此可见,  $\text{NH}_4\text{-N}$  的扩散占 N 扩散的绝大部分,总体来看 DN 由沉积物向上覆水输送,输送通量为  $6415.36 \mu\text{mol/m}^2$ 。  $\text{PO}_4\text{-P}$  (DIP) 同样也是由沉积物向上覆水输送,但其扩散通量跟 N 比较小很多,只有  $5.28 \mu\text{mol/m}^2$ ,这可能与该区域营养盐为高氮低磷的特征有关(具体的通量数值根据同期未发表的数据计算得到)。

#### 2.4.3 浮游植物对该区域营养盐的吸收

本文利用同化系数将叶绿素 a 含量换算为海洋初级生产力,同化系数代表了单位叶绿素 a 在单位时间内同化无机碳的能力,是表征浮游植物光合作用(固碳)强度的量值。进而通过 Redfield 比值 C:N:P = 106:16:1 估算浮游植物对该区域营养盐的吸收量<sup>[18]</sup>。

叶绿素 a 的固碳强度用下式计算<sup>[19]</sup>。

$$P_s = c_a \cdot Q \quad (3)$$

式中:  $P_s$  为表层水中浮游植物的潜在生产力 [ $\text{mg C}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ];  $c_a$  为表层叶绿素 a 的含量 ( $\text{mg}/\text{m}^3$ );  $Q$  为同化系数,是指单位叶绿素 a 在单位时间内合成的有机碳量,是用来表征浮游植物光合作用强度的量值(以 C 计) [ $\text{mg}/(\text{Chl}a \cdot \text{h})$ ]。同化系数  $Q$  在不同的海域、不同季节由于光、水温、营养盐等理化因子的影响是可变化的,本文中取一个平均值  $Q = 3.7^{[20]}$ 。为计算该区域单位水柱中叶绿素 a 的固碳强度,将本文中叶绿素 a 的固碳强度公式更正为

$$P = P_s \cdot h \quad (4)$$

式中:  $P$  为水中浮游植物的潜在生产力(以 C 计) [ $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ];  $h$  为水深,本文中取水深  $h = 1 \text{ m}$ 。

将该区域 104 个采集叶绿素 a 的站位所测得的数据计算平均值,根据更正的固碳强度公式(4),计算所得其平均固碳强度  $\bar{P} = 40.46 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。据所测得的平均固碳强度  $\bar{P}$ ,通过 Redfield 比值 C:N:P = 106:16:1,计算得到一个潮周期内浮游植物对该区域营养盐的吸收量, DN 为  $5235.13 \mu\text{mol/m}^2$ , DIP 为  $147.77 \mu\text{mol/m}^2$ 。

#### 2.4.4 潮间带营养盐的输送特征

通过上述讨论可知,潮间带区域水体营养盐由陆源

输入后主要向开放海域水体输送(夏季 DN 输送量为  $15.70 \times 10^7 \mu\text{mol/m}^2$ , DIP 为  $0.46 \times 10^7 \mu\text{mol/m}^2$ ),且输送的量远远大于沉积物-水体界面的交换通量(DN 为  $6415.36 \mu\text{mol/m}^2$ , DIP 为  $5.28 \mu\text{mol/m}^2$ )和浮游植物对潮间带营养盐的吸收量(DN 为  $5235.13 \mu\text{mol/m}^2$ , DIP 为  $147.77 \mu\text{mol/m}^2$ )。除了陆源做为潮间带营养盐的一个补充源头外,沉积物也向该区域补充了一定的 N 和 P。由此可见,潮间带营养盐的输送特征主要表现为向外输出,且向开放海域水体的输送量占绝对优势,沉积物对潮间带营养盐的补充和浮游植物对营养盐的吸收与其相比可以忽略不计。

### 3 小结

(1) 秋、春和夏季 DTN 的浓度范围分别为  $27.55 \sim 88.53 \mu\text{mol/L}$ ,  $96.00 \sim 249.75 \mu\text{mol/L}$  和  $92.97 \sim 265.33 \mu\text{mol/L}$ ; DN 的浓度范围分别为  $8.86 \sim 85.82 \mu\text{mol/L}$ ,  $70.56 \sim 235.09 \mu\text{mol/L}$  和  $64.08 \sim 152.17 \mu\text{mol/L}$ ; DTP 的浓度范围分别为  $0.22 \sim 3.14 \mu\text{mol/L}$ ,  $1.04 \sim 5.27 \mu\text{mol/L}$  和  $1.40 \sim 8.03 \mu\text{mol/L}$ ; DIP 的浓度范围分别为  $0.03 \sim 0.67 \mu\text{mol/L}$ ,  $0.12 \sim 0.83 \mu\text{mol/L}$  和  $1.12 \sim 5.31 \mu\text{mol/L}$ ; 秋季和夏季 DIS 的浓度范围分别为  $5.78 \sim 21.19 \mu\text{mol/L}$  和  $79.84 \sim 310.44 \mu\text{mol/L}$ 。水体的温度、盐度、N、P 和 Si 营养盐都很好的显示出季节的特点,春季和夏季航次溶解态无机 N、P 和 Si 营养盐都保持在较高的浓度,远远高于秋季航次。

(2) N 主要来自陆源输入。秋季航次的调查表明该区域 DIP 和 DTP 亦与陆源输入有关,而春季航次和夏季航次的调查表明该区域潮间带 P 主要来自水体对沉积物表层的搅动而引起的释放。该区域潮间带 DIS 来自陆源输入。

(3) 计算一个潮周期内潮间带区域的营养盐交换通量得知,该区域营养盐主要来源于陆源输入,且该区域对开放海域水体的营养盐输送量(DN 为  $15.70 \times 10^7 \mu\text{mol/m}^2$ , DIP 为  $0.46 \times 10^7 \mu\text{mol/m}^2$ ) 远大于沉积物对水体的营养盐补充(DN 为  $6415.36 \mu\text{mol/m}^2$ , DIP 为  $5.28 \mu\text{mol/m}^2$ ) 和浮游植物的对营养盐的吸收(DN 为  $5235.13 \mu\text{mol/m}^2$ , DIP 为  $147.77 \mu\text{mol/m}^2$ )。

(4) 潮间带营养盐的输送特征主要表现为向外输出,且向开放海域水体的输送量占绝对优势,沉积物对潮间带营养盐的补充和浮游植物对营养盐的吸收与其相比很小。

致谢:感谢中国海洋大学化学化工学院陈洪涛老师对本研究测试方法的帮助和指导,感谢课题外业调查人员在样品采集中的帮助,也感谢审稿专家对本文提出的宝贵意见。谨致谢忱!

(下转第 104 页)

表 1 准确度和精密度测定试验

Tab 1 Test of accuracy and precision

测定次数	$c / \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	
	1号质控样	2号质控样
1	46.16	76.27
2	47.23	76.27
3	45.20	77.18
4	45.15	74.55
5	44.43	76.27
6	44.57	76.82
7	46.06	77.54
平均浓度	45.63	76.41
RSD / (%)	2.17	1.26

表 2 塘沽海水养殖地区海水加标回收率实验

Tab 2 Recovery of phenolics in seawater of Tanggu

加标前 浓度	$c / \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$		加标回 收率 / (%)
	平均加标 浓度	平均测定 浓度	
0	0.002	0.0021	105
0	0.005	0.0048	96
0	0.01	0.0097	97
0	0.02	0.0201	101

### 3 结 论

采用流动注射方法测定海水中的挥发酚类物质,具

表 3 厦门海水养殖地区海水加标回收率实验

Tab 3 Recovery of phenolics in seawater of Xiamen

加标前 浓度	$c / \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$		加标回 收率 / (%)
	平均加标 浓度	平均测定 浓度	
0	0.002	0.0019	95
0	0.005	0.005	100
0	0.01	0.0101	101
0	0.02	0.0205	103

有操作简便、节省时间、避免有机试剂污染的优点,同时测定方法的线性、精密度、灵敏度和准确度均达国家标准要求。海水较之地表水具有盐度高、基体成分复杂的特点,我们通过对海水中加标回收率的测定表明这些因素并没有对测定造成干扰,本方法可以准确的测量海水中挥发酚类物质的含量。流动注射技术应用于海水养殖方面的检测,具有很大的优势,值得进一步推广。

#### 参考文献:

(上接第 80 页)

#### 参考文献:

- [1] 王奎,金明明,陈建芳,等. 三门湾海域 4-7 月营养盐分布及其稀释效应[J]. 海洋学研究, 2007, 25(1): 10-22.
- [2] 高生泉,林以安,金明明,等. 春、秋季东、黄海营养盐的分布变化特征及营养结构[J]. 东海海洋, 2004, 22(4): 38-50.
- [3] CLOERN J E. Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem[J]. Marine Ecology Progress Series, 2001, 210: 223-253.
- [4] GUO L D. Speciation and fluxes of nutrients (N, P, Si) from the upper Yukon River[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2004, 18: 1-12.
- [5] MEYBACK M. Carbon, nitrogen and phosphorus transport by world rivers[J]. Am J Sci, 1982, 282: 401-450.
- [6] TURNER R E, RABALAIS N N, JUSTIC D, et al. Global patterns of dissolved N, P and Si in large rivers[J]. Biogeochemistry, 2003, 64: 297-317.
- [7] ZHANG J. Nutrient elements in large Chinese estuaries[J]. Continental Shelf Research, 1996, 16(8): 1023-1045.
- [8] ANDERSON L, RYDBERG L. Trends in nutrients and oxygen conditions within the Kattegat Effects on local Nutrient supply[J]. Estuarine Coastal Shelf Sci, 1988, 26: 559-579.
- [9] BOYNTON W R, GARBBER J H, SUMMER R, et al. Inputs, transformation and transport of nitrogen and phosphorus in Chesapeake Bay and selected tributaries[J]. Estuaries, 1995, 18: 285-314.
- [10] BROCKMANN U, BILLEN G, GIESKES W C. North Sea nutrients and eutrophication[A]. Pollution of the North Sea and as-

[1] GB 3097-1997. 海水水质标准[S].

[2] 水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法(第四版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

[3] 赵萍,肖靖泽,陈金辉. 在线蒸馏流动注射分析法测定水中挥发性酚的研究[J]. 现代仪器, 2007, 13(3): 69-71.

essment[C]. Berlin: Springer-Verlag, 1988, 348-389.

- [11] 李肖娜,刘素美,张经. 河流输送和沉积物-水界面交换对东、黄海营养盐的贡献[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.
- [12] GRASSHOFF K, EHRHARDT M, KREMLING K. Methods of Seawater Analysis[M]. Verlag Chemie GmbH, D-6940 Weinheim, 1983.
- [13] 毕玲玲. 胶州湾悬浮物组成特征及对营养盐的吸附解吸作用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.
- [14] 邓声贵,李广雪,杨荣民. 黄河三角洲清水沟流路叶瓣体演化[J]. 海洋科学, 2006, 30(12): 32-36.
- [15] 罗淑葱,秦伯强,朱广伟,等. 动力扰动下太湖梅梁湾水-沉积物界面的营养盐释放通量[J]. 中国科学 D 辑, 地球科学, 2005, 35(增刊 II): 166-172.
- [16] LI Y H, GREGORY S D. Diffusion of ions in seawater and deep sea sediments[J]. Geochemistry et Cosmochimica Acta, 1974, 38: 703-714.
- [17] JENS K, GUNDERSEN, BO BARKER, JORGENSEN. Microstructure of diffusive boundary layers and the oxygen uptake of the sea floor[J]. Nature, 1990, 345(14): 604-607.
- [18] 郑国侠,宋金明,戴纪琴,等. 南黄海秋季叶绿素 a 的分布特征与浮游植物的固碳强度[J]. 海洋学报, 2006, 28(3): 109-118.
- [19] 王俊,李洪志. 渤海近岸叶绿素和初级生产力研究[J]. 海洋水产研究, 2002, 23(1): 22-28.
- [20] 费尊乐, TREES C C, 李宝华. 利用叶绿素资料计算初级生产力[J]. 黄渤海海洋, 1997, 15(1): 35-47.