

黄河三角洲潮间带营养盐的分布特征及其影响因素*

张 鹏¹, 邹 立^{1,2}, 姚 晓¹, 郭新宇³, 高会旺^{1,2}, 山口一岩³

(中国海洋大学 1. 环境科学与工程学院; 2. 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: 为探讨潮间带区域营养盐的分布和输运特征, 于 2007 年 7 月在东营黄河三角洲潮间带进行了现场调查, 采集并分析上覆水和间隙水溶解无机态硝酸氮($\text{NO}_3\text{-N}$)、氨氮($\text{NH}_4\text{-N}$)、亚硝酸氮($\text{NO}_2\text{-N}$)、磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)、硅酸盐($\text{SiO}_3\text{-Si}$), 以及溶解总氮(DTN)和总磷(DTP)含量。结果表明: (1) 潮间带水体中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度变化范围分别为 $0\sim 80\ \mu\text{mol/L}$ 和 $0\sim 24\ \mu\text{mol/L}$, 平均浓度分别为 $30\ \mu\text{mol/L}$ 和 $10\ \mu\text{mol/L}$, 均为由近岸向海和由南向北逐渐降低; $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度变化范围为 $10\sim 50\ \mu\text{mol/L}$, 平均浓度为 $30\ \mu\text{mol/L}$, 由近岸向海由北向南逐渐降低; $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度在 $0\sim 0.12\ \mu\text{mol/L}$ 间变化, 平均浓度为 $0.04\ \mu\text{mol/L}$, 整体由南向北浓度逐渐降低。(2) 潮间带间隙水中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度变化范围为 $120\sim 180\ \mu\text{mol/L}$, 平均浓度为 $140\ \mu\text{mol/L}$; $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度变化范围为 $0\sim 16\ \mu\text{mol/L}$, 平均浓度为 $6\ \mu\text{mol/L}$, 由西南部近岸的高值区向离岸方向逐渐降低; $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度变化范围为 $2\sim 24\ \mu\text{mol/L}$, 平均浓度为 $10\ \mu\text{mol/L}$, 除近岸的低值区, 整个区域浓度变化不大; $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度变化范围为 $0.1\sim 1.5\ \mu\text{mol/L}$, 平均浓度为 $0.3\ \mu\text{mol/L}$, 由西北和东南两个高值区向其他区域逐渐降低; $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度变化范围为 $30\sim 80\ \mu\text{mol/L}$, 平均浓度为 $50\ \mu\text{mol/L}$, 由近岸向离岸方向逐渐降低。为探讨潮间带区域沉积物营养盐的输送方向, 进行实验室淋溶实验, 结果表明: 落潮时 DTN 和 DTP 浓度都是由沉积物表层向底层递增, 低潮和涨潮时 DTN 和 DTP 浓度则反相变化。根据化学计量限制计算, P 和 Si 都可能成为该区域底栖藻生长繁殖的限制性因子, 其中 P 是首要影响因素。

关键词: 黄河三角洲潮间带; 上覆水; 间隙水; 营养盐

中图法分类号: X143

文献标识码: A

文章编号: 1672-5174(2009)03 II-381-08

潮间带是海陆相互作用的一个重要界面, 不仅是生物的栖居、繁殖场所及供饵仓库, 也是净化污水、削弱陆源污染物入海通量的一道屏障; 同时作为海源和陆源及人为源有机物质首先发生积累和反应的区域, 使其成为世界上生产力最高的海洋区域之一。物质和能量在潮间带的汇聚和释放过程说明, 潮间带是地球(地表)物质和能量循环与流动的一个主要的横截面, 研究这个横截面上的物能通量, 对于认识整个地球系统的物质循环和能量流动都具有重大而深远的意义^[1]。

氮(N)、磷(P)和硅(Si)是海洋藻类生长繁殖必需的营养要素, 也是影响甚至控制海洋藻类生长的重要因素。当 P 缺乏时, 细胞蛋白质、叶绿素 *a* (Chl *a*) 和遗传物质(RNA 和 DNA)的含量减少, 内呼吸增加, 光合作用下降^[2]; 当 N 缺乏时, 导致呼吸率的增加以及细胞中碳水化合物储量的下降^[3]。因此营养盐的分布特点和输送途径, 对于初级生产者的分布和潮间带生产力的强弱有着举足轻重的作用。

潮间带营养盐的分布和输送与多种因素有关, 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。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、对流扩散等作用影响其分布。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 (Anderson, 1988; Boynton, 1995; Brockmann, 1988)。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” (Baumert, 1996), 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^[9]。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分布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。黄河三角洲土地辽阔, 石油、天然气、卤水等资源丰富, 还有大面积的浅海海面、滩涂和草场, 是山东半岛和京津两大经济发达地区的连接地

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

收稿日期: 2009-03-10; 修订日期: 2009-04-21

作者简介: 张 鹏(1984-), 男, 硕士生, 研究方向为环境化学。E-mail: bandao20@ouc.edu.cn

带,被称为黄河下游的“金三角”^[4]。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,养殖方式是人工播苗为主,自然生长成熟。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。本文通过对潮间带区域上履水和间隙水的调查,以及实验室沉积物营养盐淋溶试验,研究该潮滩营养盐的分布特征,探讨潮涂营养盐的主要来源和传输过程。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

现场调查和样品采集进行于2007年7月,调查区域位于黄河入海口西南部,莱州湾西部的潮间带(即潮上线和潮下线之间的区域),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,水体采样由南向北共计8个断面,分别记为1~6号断面和b,c断面,每个断面垂直于海岸线由近岸向海上离岸方向延伸;潮间带间隙水采样由南向北共计7个断面,分别记为L,C,B,N,P,Q和R断面,每个断面垂直于海岸线由近岸向陆上离岸方向延伸;潮间带宽度差别使得不同断面的站位间隔不同。潮间带水体样品采集于高潮时,以船为载体,取表层水,合计91个站位;潮间带间隙水采集于低潮时,以徒步形式进行,合计59个站位。

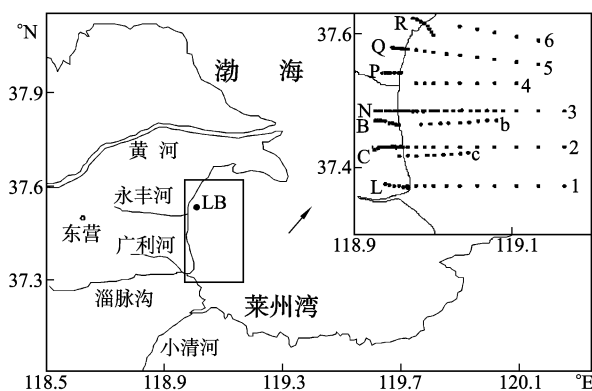


图1 2007年7月黄河三角洲潮间带调查站位示意图

Fig.1 Sampling sites in the intertidal area of the Yellow River Delta in July, 2007

为探明潮间带沉积物间隙水营养盐由表层向深层的变化规律,分别在落潮和涨潮期间,以及低平潮时于同一地点(LB点)各采集了1根柱状样品,用于实验室营养盐淋溶试验。

1.2 样品采集与处理

潮间带水体营养盐样品经过滤($0.45\ \mu\text{m}$)后,以氯

仿固定冷冻保存,直至实验室分析。潮间带间隙水的采集使用离心法^[5],先以高转速离心机将沉积物颗粒物与间隙水分离,再将间隙水过滤($0.45\ \mu\text{m}$),同样以氯仿固定冷冻保存,直至实验室分析。

1.3 沉积物营养盐淋溶实验

为探讨潮间带沉积物间隙水营养盐由表层向深层的变化规律,取沉积物柱状样品,按 $0\sim 2.5\ \text{cm}$, $2.5\sim 7.5\ \text{cm}$ 和 $7.5\ \text{cm}\sim$ 底的间隔切割样品,分别代表表层、次表层和深层沉积物。潮间带沉积物以砂质为主,上述切割沉积物难以离心或压榨法采集到足够的间隙水样品量,因此将沉积物带回实验室后进行淋溶实验,得到间隙水营养盐由表向底的变化趋势。具体做法如下:分别将各段泥样混匀,每段称取 $5.00\ \text{g}$ 样品放入备好的三角瓶中,加入 $50\ \text{mL}$ 去离子水,用振荡器(HZP-250型,全温振荡培养箱)振荡 $8\ \text{h}$;沉降后取上清液经 $0.45\ \mu\text{m}$ 滤膜过滤,滤液保存方法同水样^[6]。

1.4 分析方法

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:硝酸氮($\text{NO}_3\text{-N}$)为镉铜还原-重氮偶氮法,亚硝酸氮($\text{NO}_2\text{-N}$)为重氮偶氮法,氨氮($\text{NH}_4\text{-N}$)为靛酚蓝法,磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$, DIP)为磷钼蓝法,硅酸盐($\text{SiO}_3\text{-Si}$, DISi)为硅钼蓝法,溶解总氮(DTN)和溶解总磷(DTP)为过硫酸钾氧化法^[7]。各项溶解无机氮 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 之和为总溶解无机氮(DIN),溶解有机氮(DON)为DTN与DIN之差,溶解有机磷(DOP)为DTP与DIP之差。

2 结果与讨论

2.1 潮间带水体中营养盐的分布特征

潮间带水体中营养盐的分布见图2。水体中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度范围分别为 $40\sim 80\ \mu\text{mol/L}$ 和 $15\sim 24\ \mu\text{mol/L}$, 其分布规律较为相似,均在调查区域的西南近岸有1个高值区,且 $\text{NO}_2\text{-N}$ 在西北近岸存在1个次高值区;整体由近岸向海洋和由南向北浓度逐渐降低, $\text{NH}_4\text{-N}$ 最低值位于调查区域的东北部潮下带,接近于 $0\ \mu\text{mol/L}$, 而 $\text{NO}_2\text{-N}$ 在整个潮下带地区都接近于 $0\ \mu\text{mol/L}$ 。与 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的分布特征不同, $\text{NO}_3\text{-N}$ 最高值位于调查区西北和西南近岸,为 $50\ \mu\text{mol/L}$, 由北向南由近岸向海洋浓度逐渐降低,最低值位于调查区域的西南部,为 $5\ \mu\text{mol/L}$ 。磷酸盐的高值为 $0.10\ \mu\text{mol/L}$, 位于调查区域的南部,整体趋势为由南向北浓度逐渐降低,最低值位于调查区域的东北部,为 $0.01\ \mu\text{mol/L}$ 。

DTN与 $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 叠加的分布相似,DTP与 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的分布相似,其浓度范围分别为,DTN在 $40\sim 140\ \mu\text{mol/L}$ 之间,平均为 $90\ \mu\text{mol/L}$;DTP

在 $0.60 \sim 1.00 \mu\text{mol/L}$ 之间,平均为 $0.85 \mu\text{mol/L}$ 。溶解总氮和总磷的比值高达 106;尤其在南部边缘有 1 个明显的相对的低氮高磷区,溶解总氮和总磷的比值为 40。该低氮高磷区的形成可能与南部广利河输入特征有关,广利

河流经东营市,生活污水对河流中营养物质的组成影响更大,生活污水中相对含磷丰富,氮的主要来源是农业施肥,由此低氮高磷来源导致该低氮高磷区的形成。

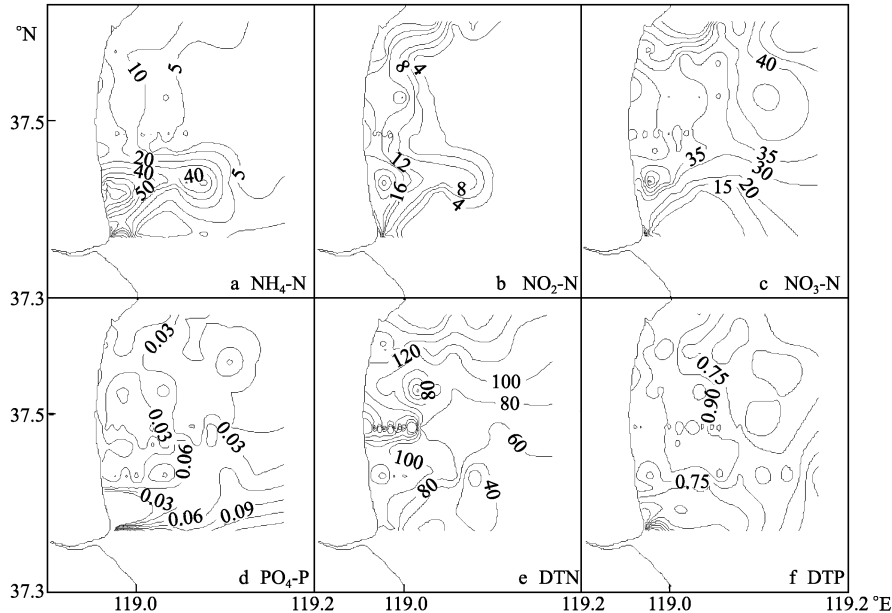


图 2 潮间带水体中营养盐分布图

Fig.2 Nutrient concentrations of surface waters in the intertidal Yellow River Delta

37.4°N 附近的近岸是河口区,淄脉河和广利河在此区域附近入海,河流输入带来大量营养物质,故在此区域各营养盐指标含量都较高。本研究结果显示河口区的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 含量相对较高,随着潮间带向海方向的延伸, $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 逐渐降低,而 $\text{NO}_3\text{-N}$ 在整个区域内分布较均匀。该分布特征一方面可能由于河海的混合作用,一方面可能由于河海水体环境变化导致。一般说来,河流中倾倒了大量的生活污水时,河口区水体呈现还原环境^[8]。还原环境使得河口区的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度较高,向海输送过程中逐渐变为氧化还境,其可能被氧化为 $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 不断降低。所以虽然由河向海的过程中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的浓度不断降低,但是 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度分布则相对均匀。

2.2 潮间带间隙水的营养盐分布特征

潮间带间隙水的营养盐分布如图 3 所示,其分布状况各不相同。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量在整个区域没有明显的高低变化,浓度范围在 $140 \sim 180 \mu\text{mol/L}$ 间。 $\text{NO}_2\text{-N}$ 在西南(37.4°N 附近)的近岸存在 1 个高值区,为 $12 \sim 16 \mu\text{mol/L}$,由此高值区向离岸方向逐渐降低。与 $\text{NH}_4\text{-N}$ 相比, $\text{NO}_3\text{-N}$ 在整个区域内含量较低,在 37.6°N 和 37.4°N 附近的近岸各存在 1 个高值区,为 $20 \mu\text{mol/L}$ 左右,在中间(37.5°N 附近)的近岸存在 1 个低值区,浓度接近 $0.00 \mu\text{mol/L}$ 。 $\text{PO}_4\text{-P}$ 在该区域的西北和东南各存在 1 个高值区,分别为 0.60 和 $1.50 \mu\text{mol/L}$,

由此高值区向周围浓度逐渐降低; $\text{PO}_4\text{-P}$ 在除高值区外区域,浓度相差不大,在 $0.10 \mu\text{mol/L}$ 左右。 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的分布无明显规律性,在近岸大部分区域内含量相对较高,浓度可达 $80 \mu\text{mol/L}$,部分较小的区域含量明显较低,可低至 $30 \mu\text{mol/L}$; $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 在离岸区域分布相对均匀,个别站点含量相对较高。

对比 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的水平分布可以发现,除 37.6°N 附近的近岸外, $\text{PO}_4\text{-P}$ 含量高的区域,浓度范围在 $0.80 \sim 1.50 \mu\text{mol/L}$ 之间, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 含量低,浓度为 $30 \mu\text{mol/L}$; $\text{PO}_4\text{-P}$ 含量低的区域,浓度为 $0.30 \mu\text{mol/L}$, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 含量高,浓度范围在 $60 \sim 80 \mu\text{mol/L}$ 之间。这可能是因为 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 主要来源于生物源的硅藻碎屑, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 含量高的区域,有大量硅藻生长,因为其自身生长繁殖的需要大量吸收 $\text{PO}_4\text{-P}$,使该区域的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 含量较低;相反, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 含量低的区域,硅藻量较少,吸收的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 也较少,从而使该区域的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 含量较高。而 37.6°N 附近的近岸由于有河流输入,能够源源不断的补充 $\text{SiO}_3\text{-Si}$,故该小块区域未呈现此规律。同期调查的底栖叶绿素 a 数据与此分布规律相一致:研究区域东部偏南的大部分区域叶绿素 a 含量较低,浓度为 $1.60 \mu\text{g/L}$,而该区域 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的含量却较高,达到 $1.20 \mu\text{mol/L}$,同时 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的含量较低,浓度为 $30 \mu\text{mol/L}$ 。由此可见,间隙水中各营养盐指标的分布特征可能与河流输入及底栖藻的分布和丰度有关。

在近岸的河口区 N 的含量较高, 水体中 DTN 的含量能够达到 $120 \mu\text{mol/L}$, 间隙水中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的含量能够

达到 $160 \mu\text{mol/L}$, 因此河流输入对该区域水体和间隙水中 N 的分布和含量有较大影响。

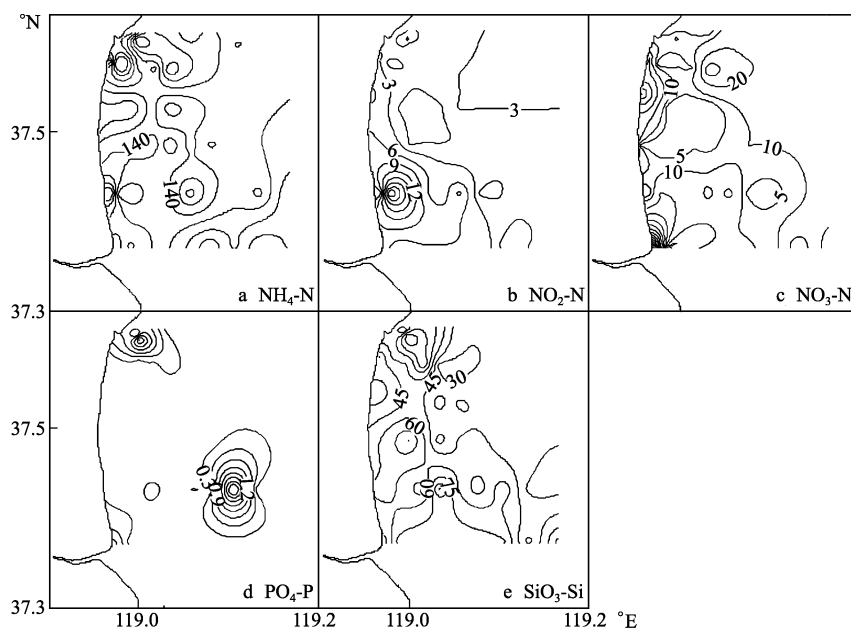


图3 潮间带间隙水中营养盐分布图

Fig.3 Nutrient concentrations of porewaters in the intertidal Yellow River Delta(units: $\mu\text{mol/L}$)

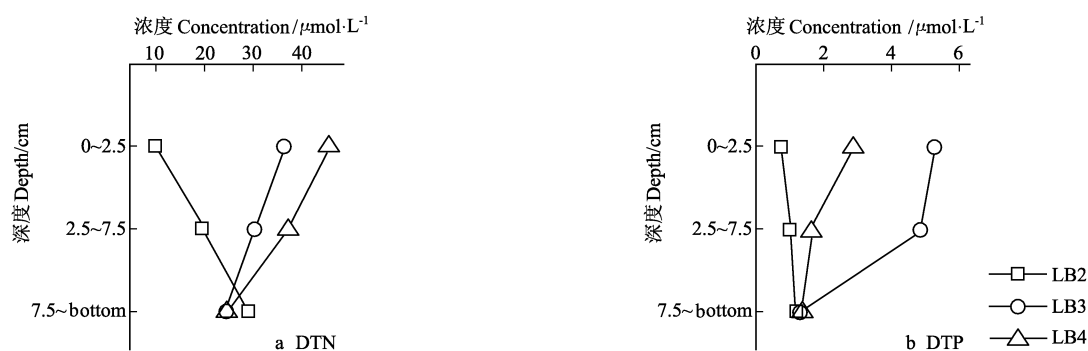


图4 柱状样淋溶实验各营养盐指标在各层的含量分布图

Fig.4 Nutrients contents in different layers distribution map

2.3 间隙水营养盐的垂直分布趋势

沉积物淋溶试验结果如图4所示。LB2, LB3 和 LB4 分别采集于落潮、低平潮和涨潮时(采样时间分别为 08:12, 11:12, 14:12), 所测得淋洗液营养盐浓度分别用于探讨落潮、低平潮和涨潮时, 沉积物间隙水的浓度梯度方向。DTN 和 DTP 显示出较明显的分布规律, 即在落潮时 DTN 和 DTP 都是由表层向底层递增, 低潮和涨潮时 DTN 和 DTP 都是由表层向底层递减。

由于潮流的作用, 落潮时表层沉积物间隙水与海水交换迅速, 使得表层沉积物间隙水中 DTN 和 DTP 低于次表层和深层沉积物间隙水。当低潮时, 潮间带表面裸露于空气中, 表层沉积物的生物活动增强, 生物代谢活动排出的有机物质使表层沉积物间隙水中 DTN 和 DTP 含量升高, 使得表层沉积物高于次表层和底层。涨潮时, 同样由于潮流作用导致表层沉积物

与海水的迅速交换, 使得表层和次表层间隙水 DTP 较低平潮时降低, 但由于潮流作用时间较短, 仍然呈现表层高底层低的现象; DTN 和 DTP 都显示出 7.5 cm 以下浓度变化相对很小, 说明该潮间带区域潮汐涨落对沉积物间隙水营养盐影响的深度可达 7.5 cm。

2.4 水体和间隙水中营养盐间的相关分析

相关分析是研究变量之间的相关关系的一种统计方法。为研究该区域水体和间隙水中各营养盐之间是否存在某种依存关系及其相关程度, 分别对水体和间隙水中各营养盐间进行相关分析, 结果分别列于表1和表2。水体中营养盐几乎所有指标之间都呈现显著的正相关关系, 而间隙水中营养盐只有 $\text{NO}_2\text{-N}$ 与 $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 之间呈现正的或负的显著相关关系。

结合图2所示水体中 $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$ 的分布可知,

水体中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 主要来源于淄脉河和广利河的输入,在河流可能存在弱氧化条件, $\text{NO}_2\text{-N}$ 除了河流的输入外,也可能由 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的硝化产生;水体中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 与 $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, DTP , DTN 呈现极显著的正相关关系,可以认为水体中 N 与 P 具有相同的来源,即河流输入。

间隙水中 $\text{NO}_2\text{-N}$ 与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 呈现正的极显著相关关系,可能由于间隙水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 与 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的硝化与反硝化作用导致。而 $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 之间呈现负的极显著相关关系,其原因还有待进一步考究。

表 1 水体中各营养盐指标相关性分析
Table 1 Correlation analysis of nutrients in water

	$\text{NH}_4\text{-N}$	$\text{NO}_2\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{PO}_4\text{-P}$	DTP	DTN
$\text{NH}_4\text{-N}$	1					
$\text{NO}_2\text{-N}$	0.877**	1				
$\text{NO}_3\text{-N}$	-0.023	0.306**	1			
$\text{PO}_4\text{-P}$	0.509**	0.416**	-0.176	1		
DTP	0.305**	0.361**	0.174	0.231*	1	
DTN	0.444**	0.513**	0.438**	0.069	0.186	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
Note: * Indicates significant correlation, confidence level <0.05 ; ** Indicates highly significant correlation, confidence level <0.01

表 2 间隙水中各营养盐指标和叶绿素 a (Chl a) 相关性分析
Table 2 Correlation analysis between the nutrients and the chl-a in porewater

	$\text{NH}_4\text{-N}$	$\text{NO}_2\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{PO}_4\text{-P}$	$\text{SiO}_3\text{-Si}$	$\text{Chl a}^\#$
$\text{NH}_4\text{-N}$	1					
$\text{NO}_2\text{-N}$	-0.086	1				
$\text{NO}_3\text{-N}$	-0.355**	0.664**	1			
$\text{PO}_4\text{-P}$	0.092	-0.093	-0.158	1		
$\text{SiO}_3\text{-Si}$	0.133	-0.249	-0.472**	0.196	1	
$\text{Chl-a}^\#$	0.185	0.254	0.057	0.140	0.008	1

注: **表示极显著相关,置信度 <0.01 ; “#”数据来自同期调查结果,未发表
Note: ** Indicates highly significant correlation confidence level <0.01 ;
Data comes from the survey results over the Same period unpublished

2.5 水体与间隙水中营养盐的关系分析

物理混合作用较小或可以忽略不计,间隙水中的物质向沉积物表面扩散以及进而向上覆水混合扩散的过程,主要由浓度差支配。因间隙水与水体中的氮磷存在浓度差异,必然存在一个由高浓度向低浓度进行的分子扩散作用^[10]。孙云明等^[11]认为沉积物与海水界面交换过程以扩散为主。海洋沉积物—海水界面间营养盐扩散通量特征是: $\text{NO}_3\text{-N}$ 的通量方向一般从上覆水向沉积物, $\text{PO}_4\text{-P}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的通量方向

往往与硝酸盐相反,即从沉积物到上覆水。本研究中潮间带间隙水 $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ 的含量约为水体中含量的 10 倍,而 $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 的含量较水体中要略低;由此推断,本研究区域 $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ 由沉积物向水体中扩散,而 $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 由水体向沉积物扩散。这一结果与孙云明等人的结论一致。因为间隙水中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的含量远远高于 $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 的含量的,并且 $\text{PO}_4\text{-P}$ 由沉积物向水体中扩散,因此沉积物是水体 N , P 除河流外的另一个源。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 由沉积物释放到水体中后可被氧化为 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$, 故水体中 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量较间隙水中高。由此推断,本研究区域沉积物表层中为弱氧化环境,水体中为氧化环境。

本研究区域内间隙水中 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的浓度为水体中的 10~30 倍。Cha 等^[12]研究指出,沉积物中磷主要以有机态磷、铁结合态磷、自生钙结合态磷和矿物晶格态磷等形式存在,其中非定型态铁的氢氧化物和氧化物具有很高的磷吸附能力,这可能是间隙水中 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度较水体中高的原因,也与 Williams 等^[13]的研究相吻合,他指出在沉积物——水界面以下的氧化带有一层对磷有很强吸附能力的铁的氢氧化物,因而表层间隙水中磷的含量偏低,到一定深度氧化条件转变为还原条件时,由于对铁的氢氧化物的还原作用,使可溶性磷再次溶入间隙水中,促使间隙水中磷浓度增高^[14]。本研究区域间隙水处于弱氧化环境,因此对磷有很强吸附能力的铁的氢氧化物对磷进行释放,使可溶性磷溶入间隙水中,故该区域间隙水中测得的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的含量较高。

2.6 间隙水营养盐与底栖叶绿素 a 的关系

底栖藻是潮间带初级生产力的主要力量,其通过光合作用对底栖环境中营养盐的吸收和转化,维持自身生长和繁殖的需要,为高营养级的生物提供食物来源。因此沉积物间隙水中营养盐含量和分布对底栖初级生产力的维持有着极其重要的作用。

同期调查结果表明(未发表数据),叶绿素 a 的含量在 37.5°N 附近的近岸和东南角上一小块区域含量较低,为 $0.50\sim1.00\text{ }\mu\text{g/L}$,其他区域含量差别较小,变化范围为 $1.80\sim2.80\text{ }\mu\text{g/L}$ 。通过同一站位不同种类营养盐与叶绿素 a 的相关分析表明(见表 2),底栖 Chl-a 与各营养盐相关性不显著,但在潮间带的大部分区域,叶绿素 a 含量低的地方, $\text{PO}_4\text{-P}$ 的含量较高,叶绿素 a 含量高的地方, $\text{PO}_4\text{-P}$ 的含量较低;而 N 和 Si 营养盐的含量和分布与叶绿素 a 并没有呈现此规律。由此推断,磷可能是该区域藻类生长的主要影响因子。

根据营养盐吸收动力学的研究结果, $\text{DIN} = 1\text{ }\mu\text{mol/L}$, $\text{PO}_4\text{-P} = 0.1\text{ }\mu\text{mol/L}$, $\text{SiO}_3\text{-Si} = 2\text{ }\mu\text{mol/L}$ 分别为浮游植物生长的阈值^[15-18]。本研究区域的 DIN ,

$\text{PO}_4\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度基本上都高于此值,可以满足底栖藻的生长需要,但是底栖环境中氮、磷、硅等营养要素的分布状况可以成为底栖藻生长繁殖的主要影响因素。同时,营养盐的组成结构对底栖藻的生长和群落结构变化也起着至关重要的影响作用。在前人工作基础上,Justic 等^[20]和 Dortch 等^[19]提出系统评估每一种营养盐化学计量限制的标准:(1) 若 $\text{DIN}/\text{PO}_4\text{-P} < 10$ 和 $\text{SiO}_3\text{-Si}/\text{DIN} > 1$,则无机氮为限制因素;(2) 若 $\text{SiO}_3\text{-Si}/\text{PO}_4\text{-P} > 22$ 和 $\text{DIN}/\text{PO}_4\text{-P} > 22$,则磷酸盐为限制因素;(3) 若 $\text{SiO}_3\text{-Si}/\text{PO}_4\text{-P} < 10$ 和 $\text{SiO}_3\text{-Si}/\text{DIN} < 1$,则硅酸盐为限制因素^[19-20]。本研究区域各种营养盐作为底栖藻限制因子的出现几率列于表 3^[21]。仅考虑化学计量标准时,本研究区域底栖藻受控于各单一营养盐限制因子的出现几率分别为:溶解无机氮为 4.2%,溶解态磷酸盐为 98.3%,溶解态硅酸盐为 45.8%。如果考虑到各种无机营养盐对底栖藻生长影响的阈值时,溶解无机氮限制的几率降为 2.8%,磷酸盐限制的几率降为 78.0%,溶解态硅酸盐限制的几率降为 30.5%。由此,磷和硅都可能成为该区域的限制性因子,但是几率不同。P 的几率最大,超过了 75%;Si 次之,超过了 30%,但低于 50%;N 成为底栖藻类生长的限制因子的几率最小,不到 5%。因此推断, $\text{PO}_4\text{-P}$ 是该区域沉积物中初级生产力最重要的影响因子。本研究中叶绿素 a 与磷酸盐间相互对应关系,亦证明这一推论。

表 3 研究区域底栖中营养盐限制因子出现几率分析比较(%, $n = 59$)

Table 3 The relative frequency comparison(%, $n = 59$) of nutrient limitation in porewater in the investigated zone

营养盐限制因子 Nutrients limiting factors	限制因子出现几率/% Emergence probabilities of limiting factors
N 为限制因子 N as the limiting factor	
$\text{DIN}/\text{PO}_4\text{-P} < 10$, $\text{SiO}_3\text{-Si}/\text{DIN} > 1$	4.2
$\text{DIN} < 1 \mu\text{mol/L}$, $\text{DIN}/\text{PO}_4\text{-P} < 10$, $\text{SiO}_3\text{-Si}/\text{DIN} > 1$	2.8
P 为限制因子 P as the limiting factor	
$\text{SiO}_3\text{-Si}/\text{P} > 22$, $\text{DIN}/\text{PO}_4\text{-P} > 22$	98.3
$\text{PO}_4\text{-P} < 0.1 \mu\text{mol/L}$, $\text{SiO}_3\text{-Si}/\text{PO}_4\text{-P} > 22$, $\text{DIN}/\text{PO}_4\text{-P} > 22$	78.0
Si 为限制因子 Si as the limiting factor	
$\text{SiO}_3\text{-Si}/\text{PO}_4\text{-P} < 10$, $\text{SiO}_3\text{-Si}/\text{DIN} < 1$	45.8
$\text{SiO}_3\text{-Si} < 2 \mu\text{mol/L}$, $\text{SiO}_3\text{-Si}/\text{PO}_4\text{-P} < 10$, $\text{SiO}_3\text{-Si}/\text{DIN} < 1$	30.5

3 结论

黄河三角洲潮间带是中国北方重要的滩涂和近海养殖区域,认知潮间带的物质来源、迁移转化和输运规律,对正确评估区域生产力,指导合理持续的养殖业具有重要意义。本文以黄河口南部潮间带为研究区域,调查其水体和沉积物间隙水中溶解态营养盐含量,阐明其分布特征,探讨营养盐的分布和输运特征对底栖初级生产的影响。主要结论如下:

(1) 潮间带水体中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度范围分别为 $0 \sim 80 \mu\text{mol/L}$ 和 $0 \sim 24 \mu\text{mol/L}$, 平均浓度分别为 $30 \mu\text{mol/L}$ 和 $10 \mu\text{mol/L}$, 其浓度变化趋势均为由近岸向海洋和由南向北降低; $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度范围为 $10 \sim 50 \mu\text{mol/L}$, 平均浓度为 $30 \mu\text{mol/L}$, 其浓度变化趋势为由近岸向海洋由北向南逐渐降低; $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度范围为 $0.00 \sim 0.12 \mu\text{mol/L}$, 平均浓度为 $0.04 \mu\text{mol/L}$, 整体趋势为由南向北浓度逐渐降低。

(2) 潮间带间隙水中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度范围为 $120 \sim 180 \mu\text{mol/L}$, 平均浓度为 $140 \mu\text{mol/L}$, 整个区域浓度没有明显的高低变化; $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度范围为 $0 \sim 16 \mu\text{mol/L}$, 平均浓度 $6 \mu\text{mol/L}$, 浓度由西南部近岸的高值区向离岸方向逐渐降低; $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度范围为 $2 \sim 24 \mu\text{mol/L}$, 平均浓度为 $10 \mu\text{mol/L}$, 除近岸的低值区, 整个区域浓度变化不大; $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度范围为 $0.1 \sim 1.5 \mu\text{mol/L}$, 平均浓度为 $0.3 \mu\text{mol/L}$, 整体趋势为由该区域西北和东南两个高值区向周围浓度逐渐降低; $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度范围为 $30 \sim 80 \mu\text{mol/L}$, 平均浓度为 $50 \mu\text{mol/L}$, 其浓度在近岸大部分区域内含量相对较高, 离岸区域含量相对较低。

(3) 沉积物淋溶试验表明, 潮汐作用导致的沉积物间隙水与海水的迅速物质交换, 对沉积物间隙水营养盐浓度具有重要影响; 通常情况下潮汐导致的混合作用降低了沉积物间隙水溶解总氮和溶解总磷的浓度; 在该潮间带区域潮汐作用对沉积物间隙水营养盐浓度的影响可达 7.5 cm 。

(4) 黄河三角洲潮间带地区 $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ 与 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 由沉积物向水体中扩散, 而 $\text{NO}_3\text{-N}$ 由水体向沉积物扩散; 河流输入对该地区水体和间隙水中 N 的分布和含量有较大影响, 水体中 N 与 P 具有相同的来源。

(5) 根据化学计量限制的计算, P 和 Si 都可能成为该区域底栖藻生长繁殖的限制性因子, 但是几率不同。P 的几率最大, 超过了 75%; Si 次之, 超过了 30%, 但总体来说低于 50%; N 的几率最小, 不到 5%。说明 $\text{PO}_4\text{-P}$ 是该地区沉积物初级生产力最重要的影响因子。

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。

参考文献:

- [1] 吴宇华. 海岸带研究的深远意义 [J]. 地球信息科学, 1997, (02): 55-56.
- [2] 杨小龙, 朱明远. 浮游植物营养代谢研究新进展 [J]. 黄渤海海洋, 1990, 3: 65-72.
- [3] Syrett P J. The assimilation of ammonia by nitrogen-starved cells of *Chlorella vulgaris*. I. The correlation of assimilation with respiration [J]. Ann Bot (London) [N S], 1953, 17: 12-19.
- [4] 吕海燕, 韩宗珠. 现代黄河三角洲陆海划界问题研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
- [5] 刘素美, 张经. 沉积物间隙水的几种制备方法 [J]. 海洋环境科学, 1999, 18(2): 66-71.
- [6] 周福来, 严家平. 淮河淮南段河道沉积物中几种重金属元素模拟淋溶实验研究 [J]. 能源环境保护, 2004, 18(4): 20-23.
- [7] Grasshoff K, Ehrhardt M, Kremling K. Methods of seawater analysis [M]. 2nd Edition. [s. l.]: Verlag Chemie GmbH, D-6940 Weinheim, 1983: 419.
- [8] 田家怡, 王秀凤, 蔡学军, 等. 黄河三角洲湿地生态系统保护与恢复技术 [M]. 第一版. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2005.
- [9] 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.
- [10] 罗玉兰, 徐颖, 曹忠. 秦淮河底泥及间隙水氮磷垂直分布及相关性分析 [J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4): 1245-1249.
- [11] 孙云明, 宋金明. 海洋沉积物-海水界面附近氮、磷、硅的生物地球化学 [J]. 地质评论, 2001, 47(5): 527-534.
- [12] Cha H J, Lee C B, Kim B S, et al. Early diagenetic redistribution and burial of phosphorus in the sediments of the southwestern East Sea (Japan Sea) [J]. Marine Geology, 2005, 216: 127-143.
- [13] Williams J D H, Jaquet J, Thomas R. Forms of phosphorus in the surficial sediments of lake [J]. Journal of the Fisheries Research Board Canada, 1976, 33: 413-429.
- [14] 黄小平, 郭芳, 岳维忠. 南海北部沉积物间隙水中营养盐研究 [J]. 热带海洋学报, 2006, 25(5): 43-48.
- [15] Brown E J, Button D K. Phosphate-limited growth kinetics of *Scenedesmus capricornutum* (Chlorophyceae) [J]. Journal of Phycology, 1979, 15: 305-311.
- [16] Perry M J, Eppley R W. Phosphate uptake by phytoplankton in the central North Pacific Ocean [J]. Deep-Sea Research, 1981, 28: 39-49.
- [17] Goldman J C, Glibert P M. Kinetics of inorganic nitrogen uptake by phytoplankton [C]. // Carpenter E J, Capone D Ge, eds. Nitrogen in Marine Environments. New York: Academic Press, 1983: 233-274.
- [18] Nelson D M, Brzezinski A. Kinetics of silicate acid uptake by natural diatom assemblages in two Gulf & Stream warm core rings [J]. Marine Ecology Progress Series, 1990, 62: 283-292.
- [19] Dortch Q, Whitledge T E. Does nitrogen or silicon limit phytoplankton production in the Mississippi River plume and nearby regions? [J]. Continental Shelf Research, 1992, 12: 1293-1309.
- [20] Justic D, Rabalais N N, Turner R E, et al. Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: stoichiometric nutrient balance and its consequences [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1995, 40: 339-356.
- [21] 宋秀贤, 俞志明. 胶州湾东北部养殖海域夏季营养盐分布特征及其对浮游植物生长的影响 [J]. 海洋与湖沼, 2007, 38(5): 446-452.

Nutrient Distributions and Influencing Factors in the Intertidal Area of the Yellow River Delta

ZHANG Peng¹, ZOU Li¹, YAO Xiao^{1,2}, GUO Xin-Yu³, GAO Hui-Wang^{1,2}, Hitomi YAMAGUCHI³

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

Abstract: In order to demonstrate the distribution and transportation of nutrients in the intertidal area of the Yellow River Delta, dissolved inorganic ($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ and $\text{SiO}_3\text{-Si}$) and organic nutrients (DTN and DTP) in the waters and porewaters were collected and analyzed in July, 2007. The results show that the $\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{NO}_2\text{-N}$ concentrations in waters ranged from 0~80 $\mu\text{mol/L}$ and 0~24 $\mu\text{mol/L}$ (averaged at 30 $\mu\text{mol/L}$ and 10 $\mu\text{mol/L}$), respectively, both decreasing from the coast to the sea and from the south to the north. The $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations ranged from 10 to 50 $\mu\text{mol/L}$ (averaged at 30 $\mu\text{mol/L}$), with the tendency of decreasing from the coast to the sea and from the south to the north. The $\text{PO}_4\text{-P}$ concentrations ranged from 0.00 to 0.12 $\mu\text{mol/L}$ (averaged at 0.04 $\mu\text{mol/L}$), decreasing from the south to the north. The $\text{NH}_4\text{-N}$ concentrations in porewaters ranged from 120 to 180 $\mu\text{mol/L}$ (averaged at 140 $\mu\text{mol/L}$). The $\text{NO}_2\text{-N}$ concentrations in porewaters ranged from 0.00 to 16 $\mu\text{mol/L}$ (averaged at 6 $\mu\text{mol/L}$), decreasing from the southwest of the coast to sea. The $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations in porewaters ranged from 2 to 24 $\mu\text{mol/L}$ (averaged at 10 $\mu\text{mol/L}$), with a comparatively unanimous distribution except a low value near the coast. The $\text{PO}_4\text{-P}$ concentrations in porewaters ranged from 0.1 to 1.5 $\mu\text{mol/L}$ (averaged at 0.3 $\mu\text{mol/L}$), decreasing two high values in the northwest and southeast to the other areas. The $\text{SiO}_3\text{-Si}$ concentrations in porewaters ranged at 30 to 80 $\mu\text{mol/L}$, decreasing from the coast to the sea. Leaching experiment on the core sediments in different layers showed that, DTN and DTP concentrations increased from the surface to deep layers in ebb tide, while decreased in flood and low tides. Based on the results from stoichiometric limiting calculation, P and Si both could be the limiting factors on the growing and reproducing of the benthic algae, among which P might be the primary one.

Key words: Yellow River Delta intertidal area; seawater; porewater; nutrients

责任编辑 庞 旻