

# 黄河三角洲南部潮间带沉积环境对底栖叶绿素 a 分布特征的影响\*

姚晓<sup>1</sup> 山口一岩<sup>2</sup> 邹立<sup>1,3\*\*</sup> 高会旺<sup>1,3</sup> 郭新宇<sup>2</sup>

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

**摘要** 2007年9月、2008年4月和2008年7月,在东营黄河三角洲南部潮间带进行了表层沉积物叶绿素 a 含量和粒径组成调查。结果表明:1)近岸区域叶绿素 a 含量由北向南逐渐增高,秋季和夏季叶绿素 a 含量分别为  $0.426 \sim 4.749 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  (平均值为  $1.591 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 和  $0.307 \sim 5.195 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  (平均值为  $1.832 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ),由潮上线到潮下线呈下降趋势;春季叶绿素 a 含量为  $0.623 \sim 8.734 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  (平均值为  $2.542 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ),由潮上线到潮下线呈上升趋势;2)沉积物类型较为单一,由粉砂、砂质粉砂和粉砂质砂组成,中值粒径变化范围为  $0.025 \sim 0.081 \text{ mm}$  (平均中值粒径为  $0.045 \text{ mm}$ ),由潮上线到潮下线逐渐增大;3)2007年9月叶绿素 a 分布主要受沉积物粒度的影响,与细颗粒物含量、中值粒径的大小及各粒径沉积物含量极显著性相关 ( $P < 0.01$ );2007年9月与2008年7月叶绿素 a 含量与细颗粒物含量呈正比关系,在砂质底质中含量较低,在粘土质底质中含量较高;4)底栖叶绿素 a 与高程呈负相关,表明松软、平整、稳定的沉积物表面有利于底栖微型藻类的生长和繁衍。

**关键词** 潮间带; 叶绿素 a; 沉积物; 粒度

中图分类号 Q178 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2010)9-1762-08

**Effects of sediment environment on distribution pattern of benthic chlorophyll-a in southern intertidal area of Yellow River Delta.** YAO Xiao<sup>1</sup>, YAMAGUCHI Hitomi<sup>2</sup>, ZOU Li<sup>1,3</sup>, GAO Hui-wang<sup>1,3</sup>, GUO Xin-yu<sup>2</sup> (<sup>1</sup>College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China; <sup>2</sup>Center for Marine Environment Studies (CMES), Ehime University, Matsuyama 7908577, Japan; <sup>3</sup>Key Laboratory of Marine Environmental Science and Ecology, Ministry of Education, Qingdao 266100, Shandong, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(9): 1762-1769.

**Abstract:** In September 2007 and in April and July 2008, sediment samples were collected from the southern intertidal area of Yellow River Delta to study the distribution pattern of benthic chlorophyll-a (Chl-a) content and its relations to sediment grain size. In study area, the Chl-a content increased from the north to the south. In the spring, the Chl-a content ranged from  $0.623 \sim 8.734 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  with an average of  $2.542 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  and increased from high tide zone to low tide zone; while in summer and autumn, the Chl-a content ranged from  $0.307 \sim 5.195 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  (averaging  $1.832 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ) and  $0.426 \sim 4.749 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  (averaging  $1.591 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ), respectively, and decreased from high tide zone to low tide zone. The sediments were unanimously composed of silt, with the median size ranging from  $0.025 \sim 0.081 \text{ mm}$  (averaging  $0.045 \text{ mm}$ ) and increased from high tide zone to low tide zone. The distribution pattern of benthic Chl-a was primarily affected by the grain size of sediment, and had significant correlation with the content of fine particles. There was a negative relationship between benthic Chl-a content and elevation height, suggesting that soft, flat, and stable sediment could benefit the growth and reproduction of benthic micro-algae.

**Key words:** intertidal area; chlorophyll a; sediment; grain size.

\* 国家自然科学基金委对外合作与交流资助项目(40711140114)。

\*\* 通讯作者 E-mail: zouli@ouc.edu.cn

收稿日期: 2010-02-27 接受日期: 2010-06-01

硅藻等底栖微藻大量存在于浅滩和潮间带,其初级生产力可以占整个潮间带海域初级生产力的50% (Perissinotto *et al.*, 2002)。底栖藻作为第一营养级,控制和影响整个底栖食物链物质流动和能量传递 (Montagna *et al.*, 1995);其光合作用产生氧气,增加沉积物-海水界面的溶解氧含量,进而影响底栖生物的生长 (Yamaguchi *et al.*, 2007),同时,底栖藻的生命活动影响着营养盐的转化过程及沉积物的物理和化学性质 (Fredericks *et al.*, 1999)。

底栖微藻在近海生态系统中的作用越来越受到重视,尤其在近几十年,底栖微藻生态学如生物量、分布特征、种群结构以及生产力等方面受到普遍关注 (Cahoon, 1999)。底栖微藻的生长受到一些非生物因素的影响,例如光照、间隙水营养盐、盐度、沉积物表层温度、沉积物稳定性等。研究发现,潮间带底栖生物量主要受到沉积物物理和化学性质的影响和控制 (Du *et al.*, 2009)。沉积物粒度及其分布是沉积物的基本性质,也是底栖生物的环境要素。一般来说,细颗粒沉积物含量越多越有利于底栖藻类的生长 (Koppel *et al.*, 2001),即沉积物叶绿素 a 含量越高,沉积物中微藻生物量也就越高。

黄河三角洲位于渤海西岸,海岸线全长 350 km,滩涂地总面积 12 万  $\text{hm}^2$ ,是山东省最大的滩涂和浅海,其底质全为泥沙,是我国重要的贝类资源基地之一。黄河三角洲一直广被关注,但研究区域多为黄河口及其邻近海域,极少涉及到潮间带区域;且研究内容多集中在入海水沙、营养盐、大型底栖动物方面 (张志南等, 1990; 沈志良等, 1991; 姜明星等, 2004),少见黄河三角洲潮间带叶绿素 a 分布特征的研究报道,仅有研究表明,黄河口及邻近海域沉积物中叶绿素 a 平均含量为  $0.78 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  (远克芬, 1990),浮游植物生长主要受磷酸盐和硅酸盐的限制 (孙军等, 2002)。不同潮间带沉积物叶绿素 a 的分布特征差异较大 (宁修仁等, 1999),这与研究区域、沉积物环境因子有关。已有报道显示,黄河三角洲北部潮间带 (1964—1976 年河口区) 沉积物来源单一,粒度参数的空间变化较小,粒径分布表现出波浪作用特征和潮流作用 (薛允传等, 2001)。而本文研究区域潮间带沉积物类型以粉砂为主,未见该区域的粒度分布研究。同样,目前缺乏对研究区域光照、沉积物稳定性等非生物因素,及其与区域初级生产力关系的相关研究。

黄河三角洲南部潮间带是重要的贝类生长基

地,本文通过调查春、夏季底栖叶绿素 a 含量,以及沉积物粒度和高度变化,研究叶绿素 a 的分布特征,解析底栖叶绿素 a 与沉积物环境非生物因素的关系,着重探讨与沉积物组成及粒度的关系。本文研究结果为预测区域初级、次级生产力,及潮间带的合理利用和可持续发展提供理论依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 站位设置和样品采集

黄河三角洲潮间带沉积物样品采集于 2007 年 9 月以及 2008 年 4 和 7 月。调查区域 ( $37.40^{\circ}\text{N}$ — $37.50^{\circ}\text{N}$ ,  $118.91^{\circ}\text{E}$ — $118.98^{\circ}\text{E}$ ) 位于黄河入海口西南部,莱州湾西部,主要入海河流有 3 条:北部永丰河、南部广利河和淄脉沟;其中,穿过东营的广利河是调查区域的主要汇入河流。研究区域分布的主要经济贝类有双壳类 (四角蛤蜊 *Macra veneriformis*、文蛤 *Meretrix meretrix*、蓝蛤 *Potamocorbula laevis*) 和单壳类 (泥螺 *Bullacta exarata*),养殖方式为人工播苗,自然生长成熟;每年春秋 2 季收捕泥螺 (苑春亭等, 2006)。采样区域和站位设置如图 1 所示,2007 年 9 月、2008 年 4 月及 2008 年 7 月,由北向南依次设置 A、B、C 3 个断面;每个断面由近岸向离岸方向延伸,根据潮间带宽度不同各断面的站位间隔略有差别,采样站位分别为 33 (2007 年 9 月)、35 (2008 年 4 月) 和 34 个 (2008 年 7 月)。

根据潮汐的变化,选取每次退大潮后,在潮间带取样,样品采集以徒步的形式进行。取样工具为改造后的塑料注射器。以注射器管垂直插入潮间带底质后轻轻拔出,用推杆从底部将柱状的泥样推出,截取表层 0~1 cm 的沉积物。每一站位在  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  的正方形范围内取样 5 次 (1 m 范围内四角及中心处),同一站位的样品装入同一样品袋中,避光冷冻保存,待测。粒度样品以平铲取得表层 0~1 cm 的沉积物,避光冷冻保存。

### 1.2 实验方法

**1.2.1 粒度分析** 沉积物粒度分析使用综合法 (筛析法加沉析法, GB/T 12763.8-2007)。样品解冻后烘至恒重,以 20 ml 4% 的六偏磷酸钠溶液浸泡 12 h 进行分散。数据分析应用北京华勘土工试验数据处理系统,沉积物分类和命名采用谢帕德的沉积物粒度三角图解法。

**1.2.2 叶绿素 a 的分析** 样品解冻后混匀,取湿样 4 g 丙酮提取,荧光分光光度法测定 (方法参照 GB/

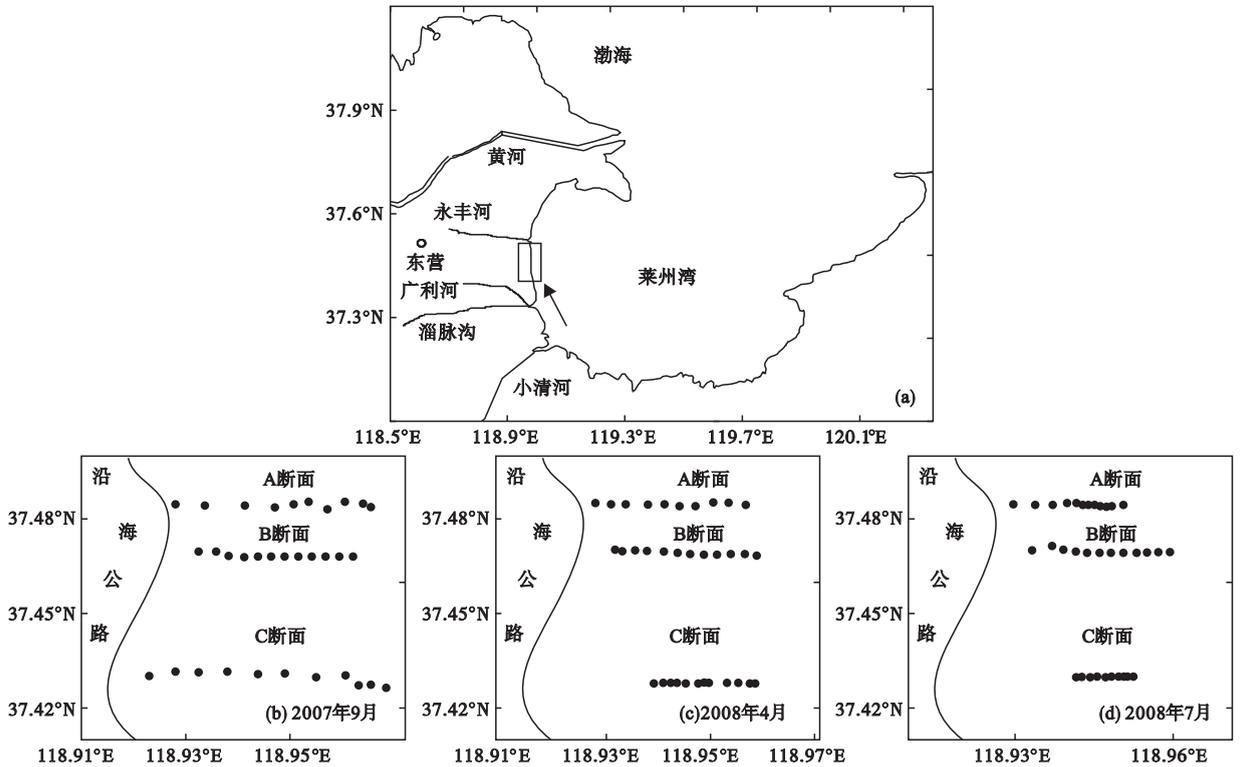


图1 黄河三角洲潮间带调查区域站位分布示意图

Fig. 1 Sampling locations in the intertidal area of the Yellow River Delta

T 12763.6-2007, 仪器采用日立 F-4500)。叶绿素 a 标准来自培养的新鲜硅藻, 以三色法确定其浓度。叶绿素 a 含量单位为  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  干重。

**1.2.3 高程的测量及其处理方法** 高程测量于 2007 年 9 月、2008 年 4 月及 2008 年 7 月进行, 以徕卡全站仪 (TCR702) 测量。3 次测量采用同一水准测量的高程零点 (位于 A 断面,  $37.48498^\circ \text{N}$ ,  $118.92551^\circ \text{E}$ )。

本文以各点的高程变化率反映地势的平坦与起伏。它是指每一季节的测量数据绘制成高程空间变化曲线, 该曲线上每一点的斜率。各站点的稳定性则由高程时间变化率表征。高程时间变化率是指单位时间内高程的变化量, 具体算法为, 以 2007 年 9 月—2008 年 4 月高程时间变化率为例, 高程时间变化率  $(_{2007\text{年}9\text{月}} - _{2008\text{年}4\text{月}}) = (\text{高程}_{2008\text{年}4\text{月}} - \text{高程}_{2007\text{年}9\text{月}}) / \text{时间}_{(2007\text{年}9\text{月} - 2008\text{年}4\text{月})}$ 。高程时间变化率单位为  $(10^{-5} \text{m} \cdot \text{d}^{-1})$ 。

### 1.3 数据处理

基于 2007 年 9 月、2008 年 4 月和 2008 年 7 月研究区域叶绿素 a 与沉积物粒度的数据, 应用相关分析 (SPSS V13.0) 分析叶绿素 a 与沉积物粒度的相关性; 基于 2007 年 9 月、2008 年 4 月和 2008 年 7

月研究区域叶绿素 a 的数据与高程时空变化率, 应用相关分析 (SPSS V13.0) 分析叶绿素 a 与沉积物稳定性的相关性。

## 2 结果与分析

### 2.1 高程的变化特征

如图 2 所示, 2007 年 9 月、2008 年 4 和 7 月, A、B 断面高潮线附近高程均较高, 随着离岸距离的增加高程逐渐降低; C 断面高程较为相近, 并且高于 A 断面和 B 断面。理论上, 高程变化越快预示该点沉积环境被扰动的程度越大, 环境越不稳定, 因此由所测高程数据计算空间和时间的变化率, 结果如图 3 所示。A 断面, 2007 年 9 月高潮线、低潮线附近及 2008 年 4 月低潮线附近高程变化率较大; B 断面, 2007 年 9 月潮间带中下部及 2008 年 4 月低潮线附近高程变化率较大; C 断面, 2007 年 9 月高潮线附近高程变化率较大。从高程时间变化率来看, 2007 年 9 月—2008 年 4 月各断面高程变化不大; 2008 年 4—7 月, A 断面高潮线附近及 B 断面高程变化较大。上述结果表明, 从空间来看, 9 月潮间带沉积环境最不稳定; 从时间来看, 潮间带 B 断面沉积环境最不稳定。

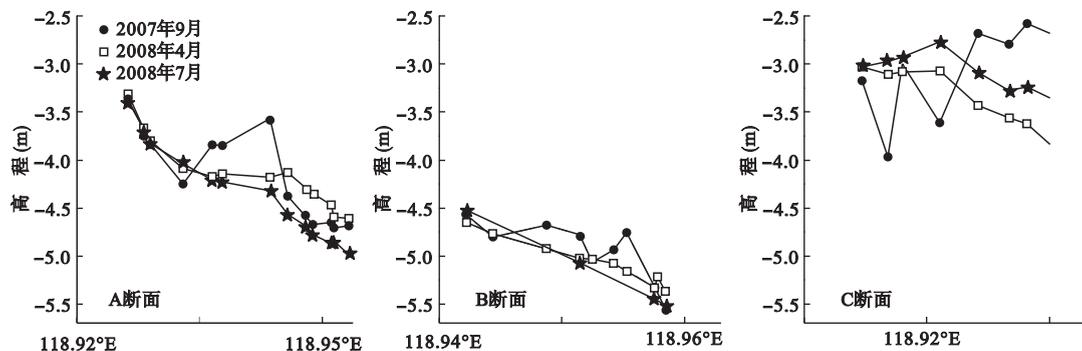


图2 黄河三角洲潮间带高程分布示意图

Fig. 2 Distribution of elevation in intertidal area of the Yellow River Delta

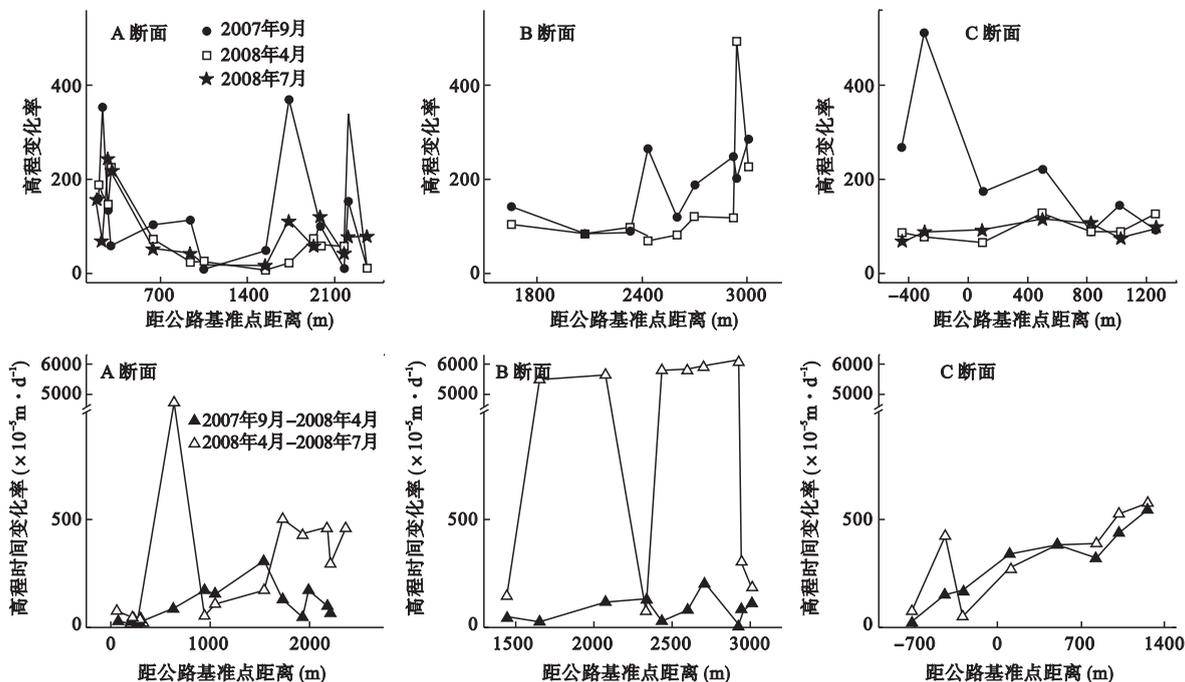


图3 高程变化率分布示意图

Fig. 3 Distribution of elevation

## 2.2 沉积物的组成特征

如图4所示,2007年9月、2008年4和7月,沉积物均由粉砂(St)、砂质粉砂(SSt)和粉砂质砂(StS)组成,研究区域沉积物类型较为单一。2007年9月沉积物中粉砂占60.61%,砂质粉砂占21.21%,粉砂质砂占18.18%;2008年4月沉积物中粉砂占28.57%,砂质粉砂占48.57%,粉砂质砂占22.86%;2008年7月沉积物中粉砂占14.71%,砂质粉砂占50%,粉砂质砂占35.29%。2007年9月,沉积物类型以粉砂为主,2008年4和7月沉积物则以砂质粉砂为主。

黄河入海泥沙是黄河三角洲沉积物的最主要来源,入海泥沙多为细颗粒泥沙,因此黄河三角洲沉积

物以细颗粒泥沙为主。有资料显示,黄河三角洲潮间带最主要的沉积物类型为粉砂,粉砂质砂和砂质粉砂呈斑状嵌于粉砂沉积的范围中(臧启运,1996)。研究区域地形开放,潮汐对底质环境影响较大,一些特殊事件,如风暴潮和人为活动等,往往引起研究区域潮滩地质条件的改变,甚至发生表层和深层沉积物的倒置现象(李凤业等,2002)。研究区域为风暴潮多发生区,且增水值在3.0 m以下的小风暴潮频繁发生。风暴潮通过侵蚀滩面、携带大量泥沙及堆积粗粒沉积物进而影响潮滩底质。2008年春季的风暴潮事件,可能是导致研究区域沉积物组成发生变化的主要原因。

如图5所示,2007年9月、2008年4和7月,沉

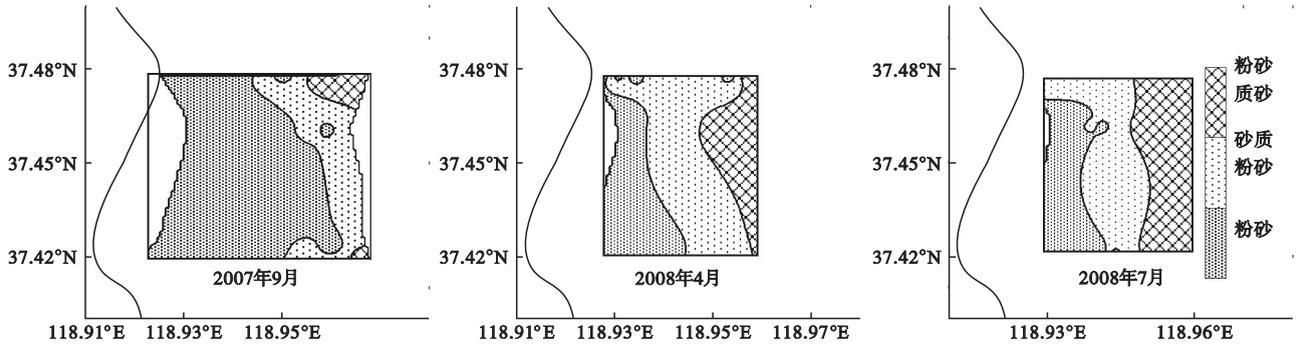


图4 黄河三角洲潮间带沉积物类型分布示意图

Fig. 4 Distribution of sediment type in intertidal area of the Yellow River Delta

积物的中值粒径变化范围分别为 0.030 ~ 0.081 mm (平均值为  $0.045 \pm 0.014$  mm)、0.025 ~ 0.067 mm (平均值为  $0.043 \pm 0.013$  mm) 和 0.030 ~ 0.069 mm (平均值为  $0.047 \pm 0.013$  mm)。中值粒径由潮上线到潮下线逐渐增大, 并且高潮线附近呈现由北向南逐渐降低的趋势 (A 断面 > B 断面 > C 断面)。中值粒径均由潮上线到潮下线逐渐增大, 这与黄河三角洲北部潮间带 (1964—1976 年河口区) P2 断面研究结果一致 (薛允传等, 2001), 黄河三角洲沉积物主要来源于黄河入海泥沙, 来源单一, 而且研究区域滩面宽度较大, 潮流作用比较显著, 细颗粒沉积物向潮间带上部输运。

### 2.3 潮间带底栖叶绿素 a 的分布特征

由图 6 可见, 2007 年 9 月航次叶绿素 a 含量由近岸的  $4.749 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  降至离岸的  $0.426 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ , 平均值为  $(1.591 \pm 1.005) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ , 整体呈现由潮上线到潮下线逐渐降低的趋势。断面 A、B 和 C 叶绿素 a 平均值 (含量范围单位  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 分别为 1.296 (0.426 ~ 3.593)、1.698 (0.660 ~ 3.253) 和 1.742 (0.547 ~ 4.749), 呈现由北向南逐渐增高的趋势。

2008 年 4 月叶绿素 a 含量由潮上线到潮下线

呈上升趋势, 变化范围为  $0.623 \sim 8.734 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ , 平均值为  $(2.542 \pm 1.835) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。断面 A 叶绿素 a 含量范围为  $0.623 \sim 3.031 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ , 平均值为  $1.804 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ; 断面 B 叶绿素 a 含量范围为  $0.909 \sim 7.779 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ , 平均值为  $3.384 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ , 叶绿素 a 含量变化较为剧烈, 在整个潮间带区域出现 3 个高值点, 分别为近岸区域 ( $7.779 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )、潮间带中部 ( $4.314 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 和离岸区域 ( $5.073 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )。断面 C 叶绿素 a 含量范围为  $0.665 \sim 8.734 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ , 平均值为  $2.333 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ; 叶绿素 a 含量最大值出现在 C 断面, 与 2007 年 9 月相似, 呈现由北向南逐渐增高的趋势。

2008 年 7 月航次叶绿素 a 含量由潮上线到潮下线呈现下降趋势, 变化范围  $0.307 \sim 5.195 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ , 平均值为  $(1.832 \pm 1.050) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。断面 A 叶绿素 a 含量范围为  $0.307 \sim 3.371 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ , 平均值为  $1.509 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ; 断面 B 叶绿素 a 含量范围为  $1.325 \sim 3.642 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ , 平均值为  $2.365 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ; 断面 C 叶绿素 a 含量范围为  $0.816 \sim 5.195 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ , 平均值  $1.580 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。近岸区域呈现由北向南逐渐增高的趋势。

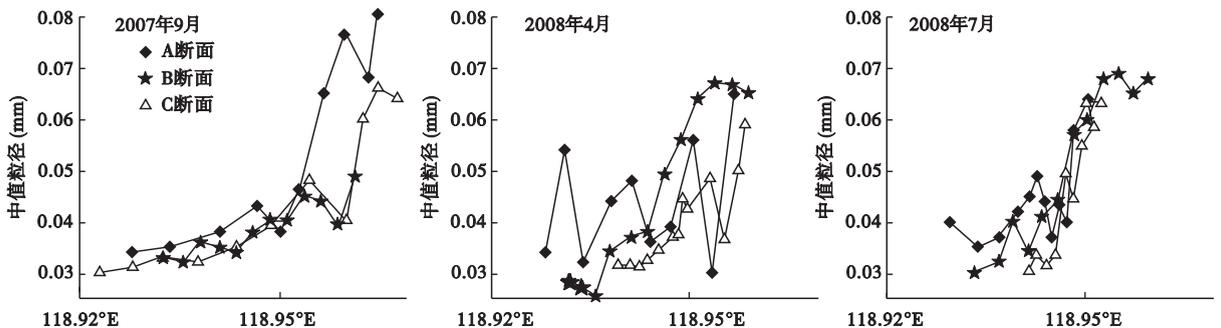


图5 黄河三角洲南部潮间带沉积物的中值粒径分布示意图

Fig. 5 Distribution of sediment grain size in intertidal area of the Yellow River Delta

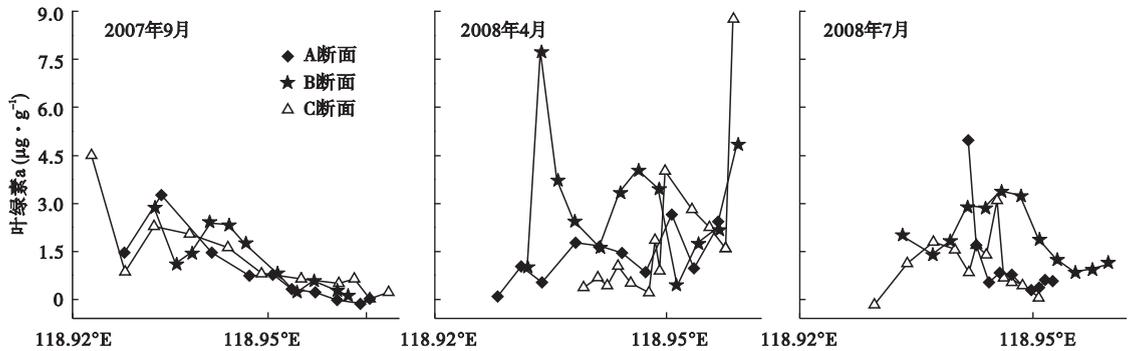


图 6 黄河三角洲潮间带表层沉积物叶绿素 a 含量

Fig. 6 Chlorophyll-a concentrations of sediment in the intertidal area of the Yellow River Delta

表 1 不同潮间带区域表层沉积物叶绿素 a 含量

Tab. 1 Chlorophyll-a concentrations in various intertidal areas

潮间带	底质类型	叶绿素 a ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$ )	文献来源
荷兰斯凯尔特河 (51.5°N)	砂-粘土	113	De Jonge & De Jonge, 1995
意大利里亚斯特湾 (45°N)	泥质	1.6 ~ 291.4	Cibic <i>et al.</i> , 2007
日本濑户海西部 (33°N)	泥-粘土	1.9 ~ 46.5	Yamaguchi <i>et al.</i> , 2007
美国墨西哥湾 (30°N)	砂质	202.8 ± 48.7	Murrell <i>et al.</i> , 2009
	泥质	54.7 ± 16.5	
胶州湾潮间带 (36°N)	粘土质粉砂-粉砂质粘土	5.2 *	吕欣欣等, 2008
长江口崇明东滩 (31°N)	粉砂	0.571 ~ 5.997 *	李万会和丁平兴等, 2007
浙江象山港 (29.5°N)	泥质	16 ~ 307	宁修仁等, 1999
黄河三角洲南部 (37°N)	粉砂	0.307 ~ 8.734 *	本研究
		3.581 ~ 85.763	

\* 单位为  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

影响底栖叶绿素 a 分布特征的因素很多,有纬度、光照、底质条件、潮汐、潮流以及营养盐等,导致各近岸和潮间带区域叶绿素 a 含量的时空变化范围广泛(表 1)。一般而言,低纬区域、充足光照、粘土-泥质底质的区域叶绿素 a 含量相对较高,如荷兰西南部斯凯尔特河西 ( $113 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ ) 与日本濑户海西部 ( $1.9 \sim 46.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ )。黄河三角洲潮间带底栖叶绿素 a 含量变化范围为  $0.307 \sim 8.734 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ , 该含量相对较低,其砂质底质是导致其含量较低的原因之一。

### 3 讨论

#### 3.1 粒度对底栖叶绿素 a 分布的影响

细颗粒泥沙具有较强的吸附能力,是营养盐和污染物等的载体,为河口区域带来了大量的营养物质。研究表明,底栖微型藻类在颗粒较粗的沉积物中比颗粒较细的沉积物中损失大,即底栖微型藻类在颗粒较细的沉积物中更易积聚和生长 (Koppel *et al.*, 2001)。因此,沉积物中细颗粒物质的含量对叶绿素 a 的分布具有重要意义。

为探讨沉积物粒度对叶绿素 a 含量分布的影响,将各采样点的叶绿素 a 含量与细颗粒物 ( $<50 \mu\text{m}$  (李万会和丁平兴, 2007)) 含量、中值粒径的大小及各粒径范围内的含量进行线性相关关系分析,结果如表 2 所示。计算结果显示,2007 年 9 月叶绿素 a 含量与细颗粒物含量、中值粒径及各粒径沉积物含量极显著性相关 ( $P < 0.01$ ),其中,叶绿素 a 含量与中值粒径的大小和  $>0.125 \text{ mm}$  粒径沉积物含量、 $0.125 \sim 0.063 \text{ mm}$  粒径沉积物含量均呈负相关关系,与其他粒径沉积物含量呈正相关关系。表明,此时叶绿素 a 分布主要受沉积物粒度影响。

2008 年 7 月叶绿素 a 含量与中值粒径的大小、 $0.125 \sim 0.063 \text{ mm}$  粒径沉积物含量均呈负相关关系,相关系数分别为  $-0.359$  和  $-0.348$  ( $P < 0.05$ ); 与  $0.016 \sim 0.008 \text{ mm}$  和  $0.008 \sim 0.004 \text{ mm}$  粒径沉积物含量呈正相关关系,相关关系分别为  $0.410$  和  $0.420$  ( $P < 0.05$ )。2008 年 4 月叶绿素 a 含量与  $>0.125 \text{ mm}$  粒径沉积物含量极显著相关 ( $r = 0.553, P < 0.01$ )。

整体看来,2007 年 9 月和 2008 年 7 月叶绿素 a

表2 沉积物中叶绿素 a 含量与粒度的相关分析

Tab.2 Correlation analysis of chlorophyll a concentration and grain size

调查时间 (年-月)	细颗粒 <0.050 mm	中值粒径	>0.125 mm	0.125- 0.063 mm	0.063- 0.032 mm	0.032- 0.016 mm	0.016- 0.008 mm	0.008- 0.004 mm	0.004- 0.002 mm	<0.002 mm
2007.9	0.742 **	-0.668 **	-0.505 **	-0.717 **	0.637 **	0.682 **	0.722 **	0.395 *	0.531 **	0.550 **
2008.4	-0.200	0.231	0.553 **	0.235	-0.293	-0.276	-0.156	0.175	0.322	0.149
2008.7	0.336	-0.359 *	-0.300	-0.348 *	0.266	0.295	0.410 *	0.420 *	-0.022	0.330

\* , $P<0.05$ ; \*\* , $P<0.01$ 。

含量与细颗粒物含量呈正比关系,且随着沉积物粒径的增大而降低,即叶绿素 a 含量在砂质底质中含量较低,而相对的在粘土质底质中含量较高,与已有的研究相符(宁修仁等,1999; Du *et al.*, 2009)。小型底栖动物的捕食,加之沉积物的再悬浮,以及沉积物的混合作用将藻类埋藏在感光区以下,使得底栖藻类在粗颗粒沉积物中的损失量较大。此外,底栖微藻在沉积物表层形成生物膜,这种生物膜在较粗的沉积物表面不易维持,在潮周期中受潮水淹没时,生物膜就能与沉积物分离,这样沉积物中藻类的生物量就要损耗。因此,底栖微型藻类在颗粒较细的沉积物中更易积聚和生长。2008年4月叶绿素 a 含量与细颗粒物含量呈负比关系,并且与中值粒径大小、大颗粒物含量呈现正比关系。显示出与2007年9月和2008年7月不同的结论,即叶绿素 a 含量在砂质底质中含量较高,相对的在粘土质底质中含量较低,这可能与间隙水营养盐限制有关,砂质底质易再悬浮,易与海水中营养盐交换;并且4月风暴潮较频繁,砂质底质再悬浮,造成海水浑浊,砂质沉积物表层的光透过率比粘土质高。

### 3.2 沉积环境稳定性对底栖叶绿素 a 分布的影响

沉积物的稳定性与沉积物运动有关(高抒等,2001),沉积物输运造成堆积和冲刷,从而改变海底的形态。黄河三角洲海岸的演变与河口流路的变化及入海水、沙的变化关系密切。由于黄河每年都携带大量泥沙进入河口地区,并且频繁在三角洲面上决口、分汊、改道,使三角洲演变剧烈,海岸变化复杂(姜明星等,2004),这决定了该地区沉积环境总体的不稳定性。潮间带底栖生物量主要受到沉积物物理和化学性质的影响和控制(Du *et al.*, 2009),因此,沉积物的稳定性会影响沉积物叶绿素的积聚。本研究以高程的时空变化程度反映沉积环境的稳定性。

底栖叶绿素 a 与高程之间呈现负比关系(表3),即在同一季节潮间带地势较为平坦(高程变化越慢的地方)区域对应叶绿素 a 高值。此外,高程的时间变化率与叶绿素的变化率也表现出负比关系,

表3 沉积物中叶绿素 a 浓度与高程的相关分析

Tab.3 Correlation analysis of chlorophyll a concentration and elevation

调查时间(年-月)	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>n</i>
2007-9	-0.155	0.460	25
2008-4	-0.283	0.191	23
2008-7	-0.396	0.115	17
2007-9—2008-4	-0.327	0.138	22
2008-4—2008-7	-0.097	0.742	14

即同一地点,沉积物稳定性越高(高程时间变化率越小),叶绿素含量越高。游离或附着的微型藻类(如硅藻、鞭毛藻和蓝绿藻等)广泛分布于潮间带沉积物表面,藻类的生存与繁衍随着沉积物表面的平整、凹陷和稳定程度而表现出生物群落的多样性和不均匀性。研究表明,松软、平整、稳定的潮滩滩面有利于底栖微型藻类的生长和繁衍(宁修仁等,1999),即沉积物稳定性越高,叶绿素含量越高,这与本文研究结果相符。

## 4 结论

黄河三角洲潮间带高潮线附近叶绿素 a 含量呈现由北向南逐渐增高的趋势;秋季和夏季叶绿素 a 含量由潮上线到潮下线呈现下降趋势;春季叶绿素 a 含量由潮上线到潮下线呈现上升趋势。

研究区域沉积物类型较为单一,由粉砂、砂质粉砂、粉砂质砂组成,高潮线附近沉积物类型为粉砂;由潮上线到潮下线,沉积物粒径变粗,中值粒径逐渐增大,与黄河三角洲沉积物来源有关。

2007年9月和2008年7月叶绿素 a 含量与粒径大小的分析表明在砂质底质中含量较低,而相对的在粘土质底质中含量较高。2008年4月叶绿素 a 含量却在砂质底质中含量较高,这可能与间隙水营养盐、风暴潮等有关。

松软、平整、稳定的沉积物表面有利于底栖微型藻类的生长和繁衍,即沉积物稳定性越高,叶绿素含量越高。潮间带陆海相互作用强烈,其中的物理过

程、生物过程、化学过程与地质过程交织耦合,环境复杂,叶绿素 a 的分布并非受到单一因子的作用,而是多个因子共同作用的结果。此外,养殖活动通过人为增强底栖动物的摄食强度,不定期破坏底栖环境,成为影响潮间带叶绿素 a 的分布不可忽视的因素。

**致 谢** 野外采样得到王玉成、杨华等的协助,室内分析得到任景玲老师和王秀海老师的支持与帮助,谨致谢忱。

#### 参考文献

- 高 抒, 方国洪, 于克俊, 等. 2001. 沉积物输运对砂质海底稳定性影响的评估方法及应用实例// 海洋科学集刊, 北京: 科学出版社: 43: 25-37.
- 姜明星, 杨风栋, 霍瑞敬, 等. 2004. 黄河三角洲海岸及滨海区演变与河口流路、入海水沙的关系. 海洋湖沼通报, (3): 6-15.
- 李凤业, 高 抒, 贾建军, 等. 2002. 黄、渤海泥质沉积区现代沉积速率. 海洋与湖沼, 33(4): 364-369.
- 李万会, 丁平兴. 2007. 滩涂沉积物中叶绿素 a 浓度与沉积特性的关系. 华东师范大学学报(自然科学版), (4): 27-33.
- 吕欣欣, 邹 立, 刘素美, 等. 2008. 胶州湾潮间带沉积物有机碳和叶绿素的埋藏特征. 海洋科学, 32(5): 40-45.
- 宁修仁, 刘子琳, 蔡昱明. 1999. 象山港潮滩底栖微型藻类现存量 and 初级生产力. 海洋学报, 21(3): 98-105.
- 孙 军, 刘东艳, 柴心玉, 等. 2002. 莱州湾及潍河口夏季浮游植物生物量和初级生产力的分布. 海洋学报, 24(5): 81-90.
- 沈志良, 陆家平, 刘兴俊. 1991. 黄河口附近海区沉积物间隙水中的营养盐. 海洋学报, 13(3): 407-411.
- 薛允传, 尹延鸿, 高 抒. 2001. 黄河三角洲北部潮间带沉积物的粒度特征. 海洋科学, 24(5): 50-54.
- 远克芬. 1990. 黄河口及邻近海域沉积物中的叶绿素和有机物. 青岛海洋大学学报, 20(1): 46-50.
- 苑春亭, 刘金明, 薄学锋, 等. 2006. 东营市潮间带泥螺增殖养殖调查报告. 齐鲁渔业, 23(3): 25-26.
- 臧启运. 1996. 黄河三角洲近岸泥沙. 北京: 海洋出版社.
- 张志南, 图立红, 于子山. 1990. 黄河口及其邻近海域大型底栖动物的初步研究. 青岛海洋大学学报, 20(1): 37-45.

- Cahoon LB. 1999. The role of benthic microalgae in neritic ecosystems. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 37: 47-86.
- Cibic T, Blasutto O, Falconi C, et al. 2007. Microphytobenthic biomass, species composition and nutrient availability in sublittoral sediments of the Gulf of Trieste (northern Adriatic Sea). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 75: 50-62.
- de Jonge DJ, de Jonge VN. 1995. Dynamics and distribution of microphytobenthic chlorophyll-a in the Western Scheldt estuary (SW Netherlands). *Hydrobiologia*, 311: 21-30.
- Du GY, Son M, Yun M, et al. 2009. Microphytobenthic biomass and species composition in intertidal flats of the Nakdong River estuary, Korea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 82: 663-672.
- Fredericks DJ, Heggie DT, Longmore A, et al. 1999. Nutrient recycling and benthic activity in a shallow coastal lagoon in Western Australia. *AGSO Research Newsletter*, 31:4-6.
- Koppel VD, Herman PMJ, Thoolen P, et al. 2001. Do alternate stable states occur in natural ecosystems Evidence from a tidal flat. *Ecology*, 82: 3449-3461.
- Montagna PA, Blanchard GF, Dinét A. 1995. Effect of production and biomass of intertidal microphytobenthos on meiofaunal grazing rates. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 185: 149-165.
- Murrell MC, Campbell JG, Hagy JD, et al. 2009. Effects of irradiance on benthic and water column processes in a Gulf of Mexico estuary: Pensacola Bay, Florida, USA. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 81: 501-512.
- Perissinotto R, Nozais C, Kibirige I. 2002. Spatio-temporal dynamics of phytoplankton and microphytobenthos in a South African temporarily open estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 55: 47-58.
- Yamaguchi H, Montani S, Tsutsumi H, et al. 2007. Dynamics of microphytobenthic biomass in a coastal area of western Seto Inland Sea, Japan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 75: 423-432.

**作者简介** 姚 晓,女,1984年生,硕士研究生。研究方向为环境科学。E-mail: yaoxiao@ouc.edu.cn

**责任编辑** 魏中青