

# 春、夏季长江口海域营养盐的时空分布特征及营养结构分析

李磊<sup>1,2</sup>, 沈新强<sup>1\*</sup>

1. 中国水产科学研究院东海水产研究所//农业部海洋与河口渔业资源及生态重点开放实验室, 上海 200090;

2. 国家海洋局第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012

**摘要:** 2009年春季(5月)和夏季(8月)分别对长江口海水中的营养盐(DIN、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ )进行调查, 分析其时空分布特征, 探讨其影响机理, 并对富营养化水平进行了评价。结果表明: 春、夏季表、底层 DIN、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  的平面分布有从近岸向离岸逐渐降低的特点, 而  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  则表现出一种缓冲现象; 各营养盐在表、底层的质量浓度春季均小于夏季, 且 DIN 的主要存在形式均为  $\text{NO}_3\text{-N}$ ; DIN、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  主要来源于径流输入,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  则有多种来源。春、夏季表、底层  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{DIN}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  均远大于 Redfield 值, 具有营养盐比例不平衡的特征, 且  $\text{DIN}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}/\text{DIN}$ 、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  在长江口海域的分布不均匀; 从浮游植物吸收  $\text{DIN}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  的配比分析,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  是春、夏季长江口海域潜在性营养限制因子; 春、夏季  $E$  值均远大于富营养化阈值, 该海域富营养化现象严重。

**关键词:** 长江口; 营养盐; 时空分布; 营养结构

中图分类号: X171.1

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2010) 12-2941-07

海水中的营养盐是海洋浮游植物生长与繁殖不可缺少的营养物质, 是海洋初级生产力和食物链的物质基础, 其质量浓度在河口的分布和变化与其来源、水平输运、垂直混合、沉积物的界面动力学过程有关, 而且与河口中的细菌、浮游植物、浮游动物等有密切关系<sup>[1]</sup>, 其分布和变化不仅直接影响到海洋初级生产力和生物资源的变动, 而且可以反映海洋环境污染的程度、生态变化的状况, 尤其是营养盐与赤潮的爆发机制的内在联系, 二者之间无论在时间、地点和规模等方面都存在着密切的相关性<sup>[2-3]</sup>。对营养盐的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。长江是世界第三大河, 年平均径流总量为  $9.24 \times 10^{11} \text{ m}^3$ , 紧邻工农业发达的长江三角地区, 受人类活动影响显著, 长江径流和河口沿岸的排放的水体携带大量的营养盐进入河口区<sup>[4]</sup>。目前关于长江口海域营养盐的时空分布变化规律, 已有不少研究报告<sup>[5-9]</sup>, 但由于长江入海后扩展范围巨大, 对周边海域营养盐理化参数影响深远, 不同区域有其独特的特征, 多数研究未将属于长江口影响海域的杭州湾、舟山附近海域纳入长江口海域进行研究, 故尚需对其做进一步的研究。本文在 2009 年春季(5月)和夏季(8月)对长江口的调查监测资料的基础上, 对长江口水体中营养盐浓度、平面分布、结构组成等进行了分析讨论, 以期补充前人的研究, 为长江口海域有关营养盐的进一步研究提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集与分析

2009年春季(5月)、夏季(8月)在长江口及海域共设置了 20 个调查站位(图 1), 使用不锈钢颠倒采水器根据各站水深采集表、底层水样, 水深 10 m 以下采集表层水样, 大于 10 m 采集表、底层水样。现场海水盐度参数应用 YSI(美国 YSI 公司出品)多参数分析仪现场测定。水样采集后水样经预先灼烧过的 Whatman GF/F 玻璃纤维素膜( $0.45 \mu\text{m}$ )过滤,

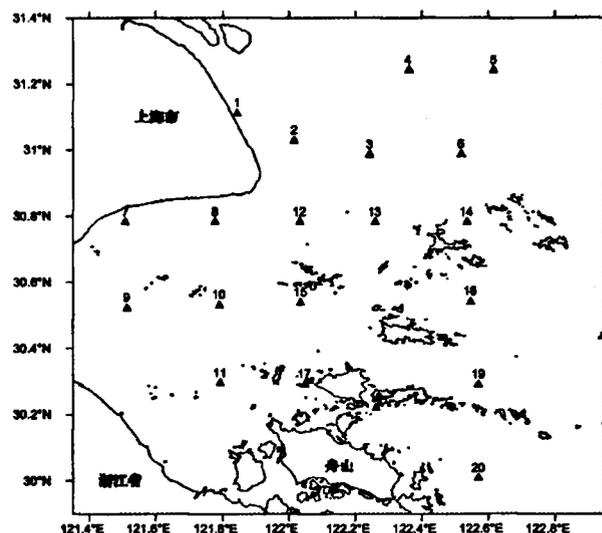


图 1 采样站位分布

Fig.1 Location of sampling stations

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目 (2010CB429005)

作者简介: 李磊 (1985 年生), 男, 硕士研究生, 研究方向: 海洋生态。E-mail: zheyilee@126.com

\*通讯作者: 沈新强(1951 年生), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事渔业生态与环境研究。E-mail: xinqiang\_shen@hotmail.com

收稿日期: 2010-11-06

用0.3%氯仿固定,低温冷冻保存,带回实验室分析。在实验室中使用SKALAR(荷兰SKALAR公司出品)营养盐自动分析仪测定溶解态无机营养盐,检测参数包括亚硝酸盐( $\text{NO}_2^-$ -N)、硝酸盐( $\text{NO}_3^-$ -N)、氨氮( $\text{NH}_4^+$ -N)、磷酸盐( $\text{PO}_4^{3-}$ -P)、硅酸盐( $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si)。 $\text{PO}_4^{3-}$ -P采用磷钼蓝法、 $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si采用硅钼蓝法、 $\text{NO}_3^-$ -N采用镉-铜还原法、 $\text{NO}_2^-$ -N采用重氮-偶氮法、 $\text{NH}_4^+$ -N采用靛酚蓝法测定。化学需氧量(COD)采用碱性高锰酸钾法测定。溶解无机氮( $\text{DIN})=\text{NO}_2^-$ -N+ $\text{NO}_3^-$ -N+ $\text{NH}_4^+$ -N。各营养盐参数的测定严格按照《海洋监测规范》<sup>[10]</sup>的有关要求进行。

## 1.2 数据处理

本文中相关性分析使用SPSS 17.0软件,相关系数采用Pearson相关系数。各营养盐的平面分布图使用Surfer 8.00软件绘制,其余图使用Sigma Plot 10.0软件绘制。

## 2 结果与讨论

### 2.1 长江口海域营养盐的平面分布和季节变化

春季时,长江口海域表层DIN平均质量浓度为 $0.646 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平面分布呈由近岸向远海逐渐递减的趋势,梯度分布明显(图2a),在西北、西南方向存在2个明显的高值区,其最高质量浓度分别为 $1.113$ 、 $0.983 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。底层DIN平均质量浓度为 $0.634 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平面分布趋势与表层相似(图2a),高值区也基本吻合,其最高质量浓度分别为 $1.090$ 、 $0.962 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

夏季时,长江口海域表层DIN平均质量浓度为 $0.825 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,在北部平面分布呈低-高-低的趋势,在南部则呈由近岸向远海逐渐递减的趋势(图3a),在中北部、西南方向存在2个明显的高值区,其最高质量浓度分别为 $1.198$ 、 $1.414 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。底层DIN平均质量浓度为 $0.708 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平面分布具有舌型分布特征(图3a),一个高值水舌自西南方向向东北方向伸展,且其值逐渐递减,在西南方向存在1个明显的高值区,其最高质量浓度为 $1.126 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

春季时,长江口海域表层 $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si平均质量浓度为 $0.626 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平面分布呈由近岸向远海逐渐递减的趋势,梯度分布明显(图2b),在西北、西南方向存在2个明显的高值区,其最高质量浓度分别为 $1.211$ 、 $0.891 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。底层 $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si平均质量浓度为 $0.618 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平面分布趋势与表层相似(图2b),高值区也基本吻合,其最高质量浓度分别为 $1.208$ 、 $0.883 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

夏季时,长江口海域表层 $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si平均质量浓度为 $0.814 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平面分布与春季相似,呈由近岸向远海逐渐递减的趋势,梯度分布明显(图3b),在西北、西南方向存在2个明显的高值区,其最高

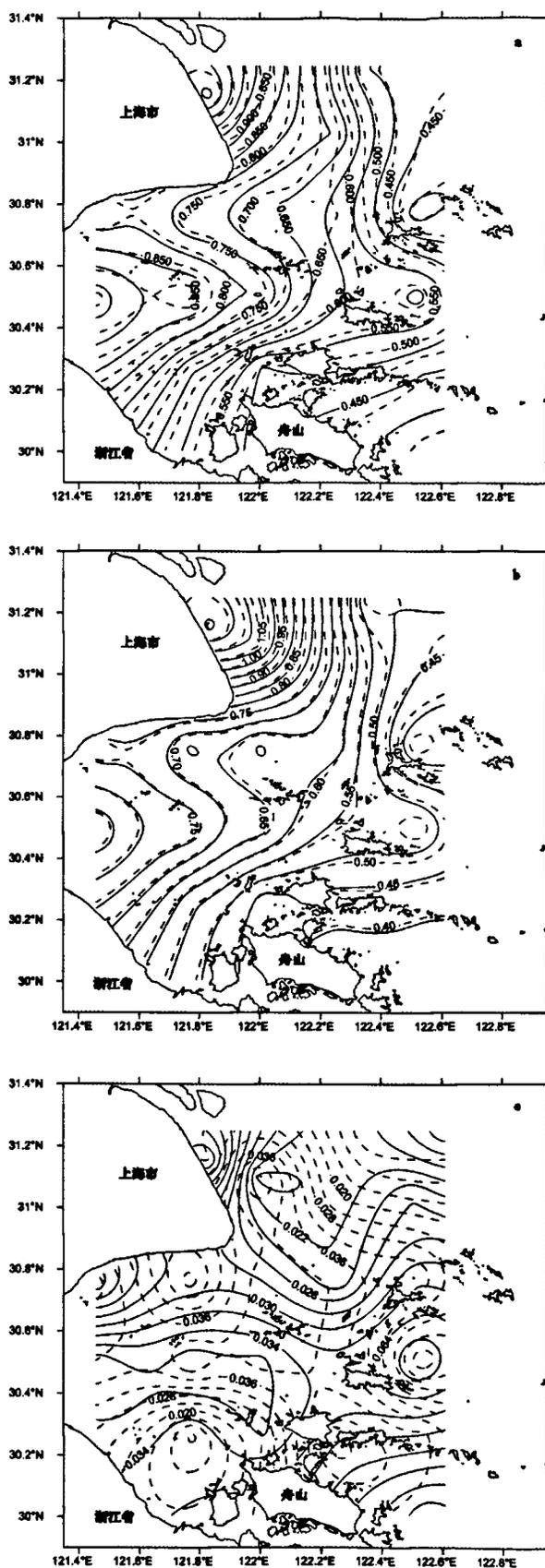


图2 长江口海域春季DIN(a)、 $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si(b)、 $\text{PO}_4^{3-}$ -P(c)质量浓度的平面分布( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , —表层, ---底层)

Fig.2 The horizontal distributions of DIN(a),  $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si(b),  $\text{PO}_4^{3-}$ -P(c) in spring of the Changjiang Estuary ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , —surface, ---bottom)

质量浓度分别为 1.171、1.057 mg·L<sup>-1</sup>。底层 SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup>-Si 平均质量浓度为 0.799 mg·L<sup>-1</sup>，平面分布趋势与表层相似(图 3b)，高值区也基本吻合，其最高浓度分别为 1.352、1.275 mg·L<sup>-1</sup>。

春季时，长江口海域表层 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 平均质量浓度为 0.029 mg·L<sup>-1</sup>，平面分布较复杂，在不同海域存在一系列的点源散发状高值区，等值线则从近岸伸展到离岸(图 2c)，在西北、西南、中东部方向存在 3 个明显的高值区，其最高质量浓度分别为 0.040、0.038、0.038 mg·L<sup>-1</sup>。底层 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 平均质量浓度为 0.030 mg·L<sup>-1</sup>，平面分布趋势与表层相似，局部存在一定差异(图 2c)，在中西部近岸的高值区相比表层偏北，导致表、底层等值线在此处形成较大差异甚至是垂直相交，其最高质量浓度分别为 0.050、0.045、0.050 mg·L<sup>-1</sup>。

夏季时，长江口海域表层 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 平均质量浓度为 0.050 mg·L<sup>-1</sup>，平面分布与春季的主要差异是中东部方向上一个非常明显的高值区消失，导致等值线从近岸到离岸分布趋势更加明显(图 3c)，在西北、西南、东南方向存在 3 个明显的高值区，其最高质量浓度分别为 0.093、0.140、0.083 mg·L<sup>-1</sup>。底层 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 平均质量浓度为 0.049 mg·L<sup>-1</sup>，平面分布趋势与表层相似(图 3c)，高值区也基本吻合，其最高质量浓度分别为 0.092、0.103、0.081 mg·L<sup>-1</sup>。

### 2.2 长江口海域营养盐的平面分布及季节变化特征

图 2 显示长江口春、夏季各营养盐在表、底层的分布趋势基本一致，由表层至底层营养盐浓度也基本相当。春季时，表、底层各营养盐质量浓度则明显小于夏季，其原因与浮游生物的活动和长江等主要河流径流的季节变化有关<sup>[11]</sup>，众多学者对营养盐吸收动力学研究表明<sup>[12-14]</sup>，DIN=0.014 mg·L<sup>-1</sup>、SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup>-Si=0.056 mg·L<sup>-1</sup>、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P=0.003 mg·L<sup>-1</sup> 为浮游植物生长的阈值，长江口海域各营养盐的平均质量浓度均远大于阈值，因此在浮游植物开始旺盛生长的春季，上层浮游植物大量摄取营养盐，DIN、SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup>-Si、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 质量浓度明显降低，且部分营养盐因此而转移，在下层则发生有机体分解，营养盐再生<sup>[15]</sup>，进入夏季后，长江等河流开始进入洪季，陆源入海径流增大所带来的补充使夏季 DIN、SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup>-Si、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 质量浓度明显高于春季。

春、夏季时，表、底层海水中 DIN、SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup>-Si 的平面分布整体均呈现出近岸高、外海低，近岸等值线密集，沿岸到离岸方向呈逐渐降低的特点，而 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 的平面分布则较为复杂，具体表现为存在多个点源散发状高值区，等值线有从近岸伸展到离岸的特点。营养盐的分布通常是物理、化学、生物等

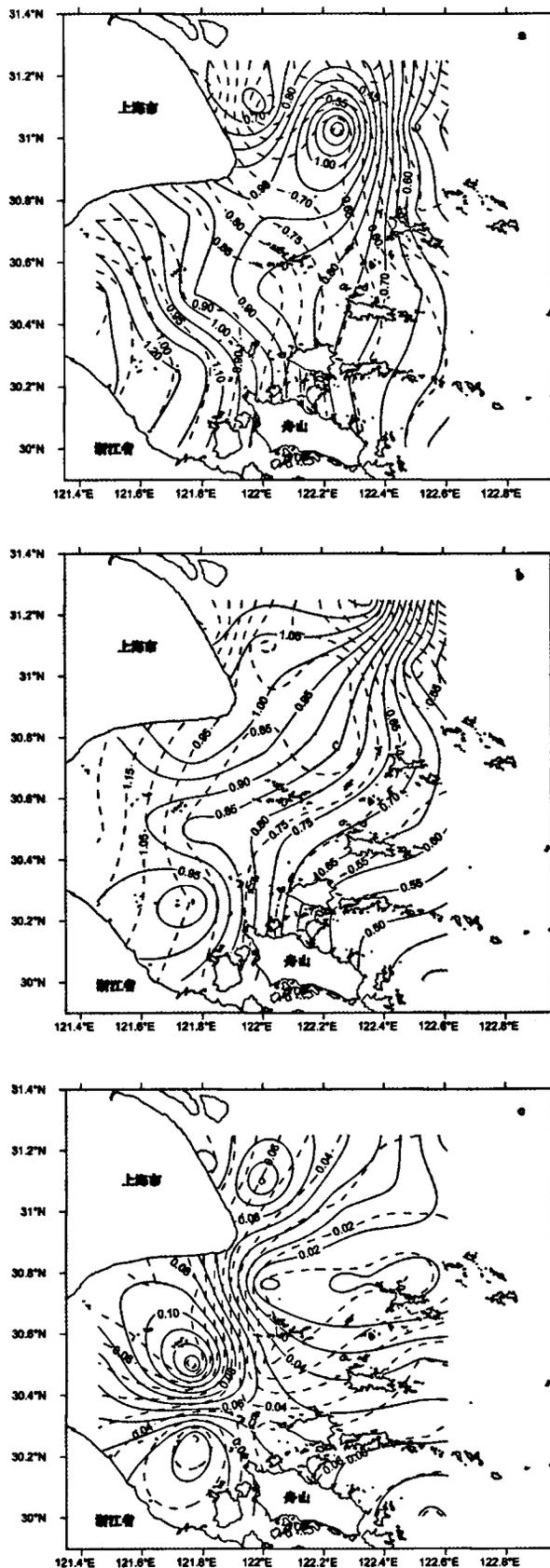


图 3 长江口海域夏季 DIN(a)、SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup>-Si(b)、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P(c)质量浓度的平面分布(mg·L<sup>-1</sup>，—表层，---底层)

Fig.3 The horizontal distributions of DIN(a)、SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup>-Si(b)、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P(c) in summer of the Changjiang Estuary (mg·L<sup>-1</sup>，—surface，---bottom)

过程共同作用的结果,对于某一自然海域,营养盐的输入途径主要有3种:垂直混和、水平输运和大气沉降<sup>[16]</sup>,营养盐在河口的加入、转移或保守程度可以通过与盐度的相关关系进行评价<sup>[17]</sup>。春、夏季长江口海域各营养盐与盐度的相关分析(表1)表明,DIN、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的质量浓度与盐度之间均存在一定程度的负相关性。其中DIN、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 在春、夏季与盐度均存在显著的负相关性( $n=40$ ,  $P<0.01$ ),表明春、夏季长江口海域DIN、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 的质量浓度与平面分布主要受制于长江等主要河流的径流输入以及与外海海流的物理混合过程及其相互消长,大量陆源径流输入引起的高冲刷作用,使DIN、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 的迁移速率比生物利用营养盐的速率大,使DIN、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 的质量浓度与平面分布呈保守或准保守行为。 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的质量浓度与盐度之间相关性较弱( $n=40$ ,  $P>0.01$ ),表现出非保守性,表明调查海域活性 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的主要来源与DIN不同,其浓度可能由长江冲淡水等陆源输入、生物活动及高盐外海水输入等多个过程共同控制<sup>[4]</sup>,其平面分布特点与 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 在河口的缓冲机制以及海底沉积物界面间的营养盐释放作用<sup>[18]</sup>有密切关系,研究表明<sup>[19-21]</sup>,河口区 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 缓冲机制主要受颗粒与水相互作用控制,由于河口悬浮物的良好吸附性能,在河口悬浮颗粒物含量较高的水域颗粒物能吸附大量的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ,而在悬浮颗粒物含量较低的水域被吸附的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 又从悬浮物中向水体释放出来,从而使 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度在整个河口内变化很小。

## 2.3 长江口海域营养盐的化学计量及营养结构

### 2.3.1 营养盐的摩尔比

海水中的 $\text{DIN}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}/\text{DIN}$ 和 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 比值是海水水体现存营养状态的

具体反映,化学计量的营养盐摩尔比<sup>[22]</sup>是根据硅藻对营养盐的需求而制定的, $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}:\text{DIN}:\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的原子比为16:16:1,在不同海域,由于物理、生物和化学等各种因子的影响不同常使这个比值发生变化。适宜的 $\text{DIN}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}/\text{DIN}$ 和 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 比值有利于浮游植物的生长和繁殖,反之,其中某种营养元素的缺乏将限制生物的生长和繁殖,而某一元素浓度过高或营养结构失调也将对浮游生物种群结构产生较大影响,甚至可引发赤潮灾害<sup>[23]</sup>。在河口区,营养盐比值及某些物理条件对富营养化的调控较单一营养盐负荷或浓度可能更加重要<sup>[24]</sup>。 $\text{DIN}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}/\text{DIN}$ 和 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 比值的分布变化不仅反映了水域营养盐的陆源输入、海流输入、大气沉降以及人类活动的影响,同时也在一定程度上也反映了海水中营养盐的再生和循环机制。

从长江口海域营养盐的摩尔比(表2)可以看出,春、夏季,表、底层的 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 平均值分别为 $(32.158\pm 35.284)$ 、 $(36.900\pm 39.164)$ , $\text{DIN}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 平均值分别为 $(31.361\pm 31.810)$ 、 $(34.873\pm 36.250)$ ,均远大于Redfield值<sup>[23]</sup>, $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}/\text{DIN}$ 则均接近Redfield值<sup>[22]</sup>,这表明长江口海域具有营养盐比例不平衡的特征。春季,表、底层海水中 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{DIN}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 比值均明显小于夏季, $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}/\text{DIN}$ 比值则变化微小,充分表明浮游植物的活动对春、夏季营养盐的摩尔比的影响<sup>[11]</sup>。根据化学计量的营养盐摩尔比,当 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}>22$ 、 $\text{DIN}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}>22$ 时为 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 限制; $\text{DIN}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}<10$ 、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}/\text{DIN}>1$ 时为DIN限制;当 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}<10$ 、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}/\text{DIN}<1$ 时为 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 限制<sup>[25]</sup>,根据该标准的判断结果表明,在长江口海

表1 长江口海域春、夏季各营养盐与盐度的相关关系(取样数为 $n=40$ ,显著性水平 $\alpha=0.01$ )  
Table 1 The correlation between nutrients and salinity in spring and summer in the Changjiang Estuary  
(samples  $n=40$  respectively, significance level  $\alpha=0.01$ )

春季营养盐	DIN	$\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	盐度	夏季营养盐	DIN	$\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	盐度
DIN	1				DIN	1			
$\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$	0.943*	1			$\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$	0.648*	1		
$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	0.337	0.272	1		$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	0.216	0.087	1	
盐度	-0.877*	-0.976*	-0.157	1	盐度	-0.891*	-0.797*	-0.220	1

“\*”表示在0.01水平上显著相关

表2 长江口海域春、夏季,表、底层营养盐摩尔比  
Table 2 The ratios of nutrients in the surface and bottom waters and spring and summer in the Changjiang Estuary

项目	表层营养盐			底层营养盐		
	$\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	$\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}/\text{DIN}$	$\text{DIN}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	$\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	$\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}/\text{DIN}$	$\text{DIN}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$
春季	23.434±10.352	0.966±0.108	23.702±7.987	33.440±30.610	0.977±0.095	33.981±30.288
夏季	40.882±47.228	1.026±0.285	39.021±42.926	40.361±45.900	1.134±0.320	35.766±41.342
平均值	32.158±35.284	0.996±0.218	31.361±31.810	36.900±39.164	1.056±0.249	34.873±36.250

域,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  即为浮游植物潜在性的限制因子, 而 DIN、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  则不会成为浮游植物(主要是硅藻)的限制因子。但  $\text{DIN}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}/\text{DIN}$ 、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  比值的散点分布(图 4)显示, 3 者的比值在长江口海域的分布并不均匀, 存在着明显的局部差异, 其中春季表、底层  $\text{DIN}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  的范围分别为 12.173~42.522、8.959~110.022, 夏季范围分别为 6.580~134.816、6.996~131.176; 春季表、底层  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}/\text{DIN}$  的范围分别为 0.839~1.299、0.840~1.173, 夏季范围分别为 0.708~1.645、0.706~1.882; 春季表、底层  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  的范围分别为 11.409~55.247、8.178~115.979, 夏季范围分别为 4.704~152.966、5.585~141.947。其原因是由

于地理位置的不同, 物质的陆源输入、海流输运、大气沉降和人类活动影响等存在较大差别, 加之受光照、水温等多种因素的影响, 不同区域水体营养结构及营养限制作用的差别较大。

2.3.2 DIN 的形态特征

海水中的 DIN 包括  $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$  3 种形态, 它们在海洋生物饵料循环中起着非常重要的作用, 当氨化及硝化作用充分进行时, 各种形态氮之间才能基本达到热力学平衡状态<sup>[26]</sup>, 图 5 清晰的显示了春、夏季, 表、底层长江口海域 DIN 的主要存在形式均为  $\text{NO}_3^- \text{-N}$ , 仅在夏季部分站位  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  相对含量占优势, 长江口是一个开放型海域, 水体交换条件好, DIN 已经充分达到热力学平衡。其中春季表、底层  $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$  3 种形态的无机氮的相对含量分别为 0.028 %、0.227 %、0.745 %, 0.230 %、0.237 %、0.740 %; 夏季表、底层  $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$  3 种形态的无机氮

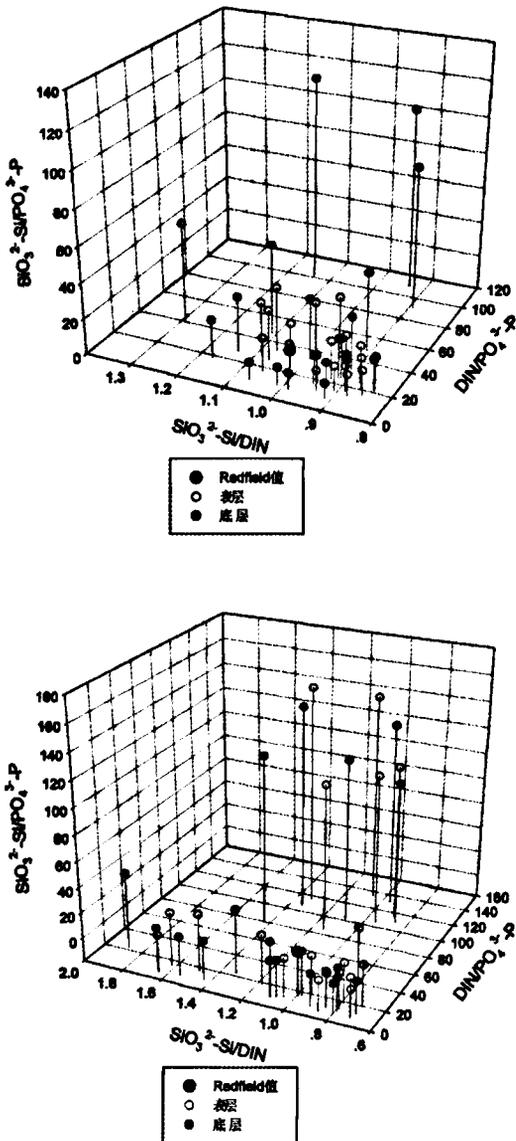


图 4 长江口海域春(a)、夏(b)季  $\text{DIN}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}/\text{DIN}$ 、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  比值的散点分布

Fig.4 The scatter distribution of  $\text{DIN}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ,  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}/\text{DIN}$ ,  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  in spring and summer in the Changjiang Estuary

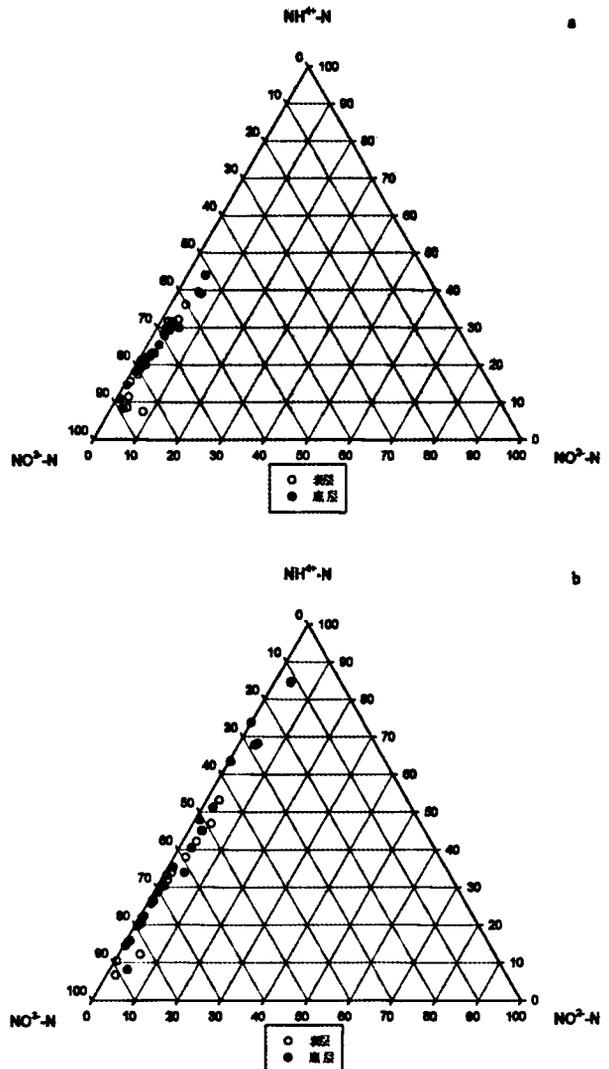


图 5 长江口海域春(a)、夏季(b)  $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  的相对含量

Fig.5 The relative content of  $\text{NO}_2^- \text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^- \text{-N}$ ,  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  in spring and summer of the Changjiang Estuary

的相对含量分别为 0.019%、0.326%、0.655%、0.019%、0.354%、0.627%。可以看出,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  相对含量在春、夏季的变化规律与  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  刚好相反, 即春季至夏季的相对含量表现为增加的趋势。这可能与夏季生物新陈代谢旺盛, 排出的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  较多, 即生物作用产生的内源性补充较多有关<sup>[27]</sup>。另外, 与夏季水温高, 促进了有机质的氧化分解, 以及细菌的活动加速了有机质的降解, 从而释放出相比较更多的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  也有密切联系<sup>[26]</sup>。

## 2.4 长江口海域富营养化评价

本文对长江口海域富营养化的评价方法采用日本的冈市友利<sup>[28]</sup>于 1972 年提出营养指数( $E$ )法, 其计算公式如下:

$$E = \text{COD} \times \text{DIN} \times \text{DIP} \times 10^6 / 4500 \quad (1)$$

式中, COD、DIN、DIP 质量浓度单位为  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 当该指数  $E \geq 1$  时, 则表示海域水体已呈富营养化状态,  $E$  值越大, 水体富营养化程度越严重。

将春、夏季长江口海域各站位 COD、DIN、DIP 检测数据代入公式(1), 计算结果表明, 春、夏季各站位的  $E$  范围分别为 0.971~17.738、0.729~64.240, 平均值分别为 5.322、20.593, 远大于富营养化阈值, 说明长江口海域在春、夏季富营养化现象严重。

## 3 结论

(1)春、夏季, 表、底层长江口海域 DIN、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  的浓度与平面分布主要受制于长江等主要河流的径流输入以及与外海海流的物理混合过程及其相互消长;  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  在长江口存在缓冲机制, 分布较为复杂; 各营养盐浓度具有明显的季节变化特点。

(2)长江口海域具有营养盐比例不平衡的特征, 春、夏季, 表、底层  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{DIN}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  均远大于 Redfield 值,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  是春、夏季长江口海域的潜在性限制因子;  $\text{DIN}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}/\text{DIN}$ 、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  在长江口海域的分布不均匀。

(3)春、夏季, 表、底层长江口海域 DIN 的主要存在形式均为  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ , DIN 已经充分达到热力学平衡; 春、夏季  $E$  值均远大于富营养化阈值, 富营养化现象严重。

## 参考文献:

[1] 黄小平, 黄良民. 河口营养盐动力学过程研究的若干进展[J]. 黄渤海海洋, 2001, 19(4): 86-92.  
HUANG Xiaoping, HUANG Liangming. Advance in the research on nutrient dynamic process in the estuarine area[J]. Journal of oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 2001, 19(4): 86-92.

[2] BRICELJ V M, LONSDALE D J. Aureococcus anophagefferens: Causes and ecological consequences of brown tides in U S mid-Atlantic coastal waters[J]. Limnol Oceanogr, 1997, 42(5): 1023-1038.

[3] HODGKISS I J, HO K C. Are changes in N:Pratios in coastal waters the key to increased red tide blooms[J]. Hydrobiology, 1997, 352: 141-147.

[4] 黄自强, 暨卫东. 长江口水中总磷, 有机磷, 磷酸盐的变化特征及相互关系[J]. 海洋学报, 1994, 16(1): 51-60.  
HUANG Ziqiang, JI Weidong. Characteristics of variation of TP, OP,  $\text{PO}_4$  and their relationship in the Changjiang Estuary water[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1994, 16(1): 51-60.

[5] 王正方, 姚龙奎, 阮小正. 长江口营养盐分布与变化特征[J]. 海洋与湖泊, 1983, 14(4): 324-332.  
WANG Zhenfang, YAO Longkui, YUAN Xiaozheng. Distribution and characteristics of nutrients(N, P, Si) in the estuary of Changjiang river in June, 1980[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 1983, 14(4): 324-332.

[6] 黄尚高, 杨嘉东, 暨卫东, 等. 长江口水体活性硅, 氮, 磷含量的时空变换及相互关系[J]. 台湾海峡, 1986, 5(2): 114-123.  
HUANG Shanggao, YANG Jiadong, JI Weidong, et al. Spatial and temporal variation of reactive Si, N, P and their relationship in the Changjiang Estuary water[J]. Journal of Oceanography In Taiwan Strait, 1986, 5(2): 114-123.

[7] 王保栋, 战阔, 臧家业, 等. 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.  
WANG Baodong, ZHAN Run, ZANG Jiaye, et al. Distributions and transportation of nutrients in Changjiang River Estuary and its adjacent sea areas[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2002, 24(1): 53-58.

[8] 石晓勇, 王修林, 韩秀荣, 等. 长江口邻近海域营养盐分布特征及其控制过程的初步研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(7): 1086-1092.  
SHI Xiaoyong, WANG Xiulin, HAN Xiurong, et al. Nutrient distribution and its controlling mechanism in the adjacent area of Changjiang River estuary[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(7): 1086-1092.

[9] 韩秀荣, 王修林, 孙霞, 等. 东海近海海域营养盐分布特征及其与赤潮发生关系的初步研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(7): 1097-1101.  
HAN Xiurong, WANG Xiulin, SUN Xia, et al. Nutrient distribution and its relationship with occurrence of red tide in coastal area of East China Sea[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(7): 1097-1101.

[10] 中华人民共和国国家质量技术监督局. GB17378-1998 海洋监测规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.  
State Technical Supervise Bureau, People's Republic of China. GB17378-1998 The specification for marine monitoring. Beijing: Standards Press of China, 1999.

[11] 潘胜军, 沈志良. 长江口及其邻近水域硅酸盐的分布变化特征[J]. 海洋科学集刊, 2008, 49: 10-18.  
PAN Shengjun, SHEN Zhiliang. Distribution and variation of silicate in the Changjiang estuary and its adjacent waters[J]. Studia Marina Sinica, 2009, 49: 10-18.

[12] BROWN E J, BUTTON D K. Phosphate-limited growth kinetics of *Selanastrum capricornatum* (Chlorophyceae) [J]. Journal of Phycology, 1979, 15: 305-311.

[13] PERRY M J, EPPLEY R W. Phosphate uptake by phytoplankton in the central North Pacific Ocean[J]. Deep-Sea Research, 1981, 28: 39-49.

[14] 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.
- [15] 沈志良, 陆家平, 刘兴俊, 等. 长江口营养盐的分布特征及三峡工程对其影响[C]//中国科学院海洋研究所. 海洋科学集刊. 北京: 科学出版社, 1992, 33: 109-129.
- SHEN Zhiliang, LU Jiaping, LIU Xingjun, et al. Distribution characters of the nutrients in the Changjiang river estuary and the effect of the three gorges project on it[C]. *Studia Marina Sinica The institute of oceanology, Academia sinica.*, Beijing: Science Press, 1992, 33: 109-129.
- [16] 任玲, 杨军. 海洋中氮营养盐循环及其模型研究[J]. *地球科学进展*, 2000, 15(1): 58-64.
- REN Ling, YANG Jun. Nitrogen nutrients cycling in marine environment and its modeling research[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2000, 15(1): 58-64.
- [17] MORRIS A W, BALE A J, HOWLAND R J M. Nutrient distribution in an estuary: evidence of chemical precipitation of dissolved silicate and phosphate[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1981, 12: 16-205.
- [18] 戚晓红, 刘素美, 张经, 等. 东海赤潮高发区沉积物中营养盐再生速率的研究[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(7): 1112-1116.
- QI Xiaohong, LIU Sumei, ZHANG Jing, et al. Nutrients regeneration speed of sediment in harmful algae blooms(HAB) area of East China Sea[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(7): 1112-1116.
- [19] FROELICH P N. Kinetic control of dissolved phosphate in natural rivers and estuaries: a primer on the phosphate buffer mechanism[J]. *Limnology Oceanography*, 1988, 33: 649-668.
- [20] FILIPELLI G M, DELANEY M L. Phosphorus geochemistry of equatorial Pacific sediments[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1996, 60: 1479-1495.
- [21] SWITZINGER S P, KROEZE C. Global distribution of nitrous oxide production and N inputs in freshwater and coastal marine ecosystems[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1998, 12: 93-113.
- [22] REDFIELD A C, KETCHUM B H, RICHARDS F A. The influence of organisms on the composition seawater [C]. HILL M N. *The Sea*. New York: John Wiley. 1963, 2: 26-77.
- [23] 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.
- GAO Shengquan, LIN Yian, JIN Mingming, et al. Distribution features of nutrients and nutrient structure in the East China Sea and the Yellow Sea in spring and autumn[J]. *Donghai Marine Science*, 2004, 22(4): 38-50.
- [24] SHARP J H. Long term nutrient trends and phytoplankton response in Delaware Estuary. USA [M]. Dallas: Crown Press, 2003.
- [25] JUSTIC D, RABALAIS N N, TURNER R E, et al. Changes in nutrient structure of river-dominated coastalwaters: stoichiometric nutrient balance and its consequences. *Estuarine[J]. Coastal and Shelf Science*, 1995, 40: 339-356
- [26] 张正斌, 顾宏堪, 刘莲生, 等. 海洋化学[M]. 上海: 科学技术出版社, 1984: 276-281.
- ZHANG Zhengbin, GU Hongkan, LIU Liansheng, et al. *Marine Chemistry*[M]. Shanghai: Science & Technology Press, 1984. 276-281.
- [27] 叶勇, 徐继林, 应巧兰, 等. 象山港网箱养鱼区海水营养盐变化研究[J]. *海洋环境科学*, 2002, 21(1): 39-41.
- YE Yong, XU Jilin, YING Qiaolan, et al. Changes of nutrient in net aquaculture area of Xiangshan Harbor[J]. *Marine Environmental Science*, 2002, 21(1): 39-41.
- [28] 全为民, 沈新强, 韩金娣, 等. 长江口及邻近水域富营养化现状及变化趋势的评价与分析[J]. *海洋环境科学*, 2005, 24(3): 13-16.
- QUAN Weiming, SHEN Xinqiang, HAN Jindi, et al. Analysis and assessment on eutrophication status and developing trend in Changjiang Estuary and adjacent sea[J]. *Marine Environmental Science*, 2005, 24(3): 13-16.

## Distribution features of nutrients and nutrient structure in the Changjiang estuary in spring and summer

LI Lei<sup>1,2</sup>, SHEN Xinqiang<sup>1\*</sup>

1. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences/Key and Open Laboratory of Marine and Estuarine Fisheries Resources and Ecology, Ministry of Agriculture, Shanghai 200090, China; 2. Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012, China

**Abstract:** Based on the data of surveys during spring (May) and summer (August) from the Changjiang Estuary in 2009, the distribution characteristics of nutrients (DIN,  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ) and nutrient structure and its influencing mechanism were analyzed, meanwhile, the pollution level was evaluated. The results showed that: the distribution characteristics of DIN,  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  decreased from inshore areas to the open sea in surface and bottom waters, in spring and summer, the distribution of  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  was characterized by the buffer mechanism. The concentrations of nutrients were lower in spring than in summer.  $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$  was the predominant species of DIN; DIN、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  was sourced by runoff,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  was regulated by many kinds of source.  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ,  $\text{DIN}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  value was higher than Redfield value with the characteristic of ratio of nutrient imbalance. The distribution of three kinds of nutrients was uneven in the Changjiang Estuary. Analyzed on the ratio of phytoplankton to absorb  $\text{DIN}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  was the potential limited factor in spring and summer. The eutrophication index of the Changjiang Estuary was higher than eutrophication threshold.

**Key words:** the Changjiang Estuary; nutrients; spatial and temporal distribution; nutrient structure