

# 长江口最大浑浊带及邻近水域营养盐的分布特征

周淑青<sup>1</sup>, 沈志良<sup>2</sup>, 李 峥<sup>1</sup>, 姚 云<sup>2</sup>

(1. 上海水产大学 生命科学与技术学院, 上海 200090; 2. 中国科学院 海洋研究所 海洋生态和环境科学重点实验室, 山东 青岛 266071)

**摘要:**根据 2003 年 11 月~2004 年 8 月 4 个航次的调查数据,探讨了长江口最大浑浊带及邻近水域营养盐的分布特征。结果表明,营养盐浓度一般随盐度的增加而减小,不同营养盐表现出不同的平面分布和季节变化特点。最大浑浊带所处地理位置、水动力状况、高悬浮体含量以及生物活动等决定了营养盐分布不同于整个调查水域。与整个调查水域相比,最大浑浊带营养盐浓度更高;无机 N 的硝化作用进行得更为充分;高的 DIN/PO<sub>4</sub>-P 和 SiO<sub>3</sub>-Si/PO<sub>4</sub>-P 比(远高于 Redfield 比),相对低的 SiO<sub>3</sub>-Si/DIN 比等。透明度是最大浑浊带浮游植物生长的主要限制因素。营养盐在河口的转移除了海水稀释作用外,还有部分的生物转移以及受悬浮体-沉积物系统的影响,特别是 PO<sub>4</sub>-P。在最大浑浊带,富营养化现象更为严重。

**关键词:**营养盐;分布特征;最大浑浊带;长江口

**中图分类号:**P734.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-3096(2007)06-0034-09

河口最大浑浊带是一个与河口环流、潮汐动力、沉积物的侵蚀及沉积等直接联系的动态现象,在径流量、输沙量大的河口,最大浑浊带持续存在。长江口最大浑浊带位于拦门沙及上下游附近地区,纵向延伸数十千米<sup>[1]</sup>。它在河口的生物地球化学过程中对许多重金属元素、有机物以及营养盐的物理化学行为、迁移和归宿产生显著影响。长江口海区,营养盐含量丰富,其中最大浑浊带对营养盐有明显的富集作用,可通过沉积作用使营养盐得到过滤和消除,水动力因素强时被吸附的营养盐还可被再悬浮,重新进入水体,加重河口最大浑浊带的富营养化。沈焕庭等<sup>[1]</sup>对长江口最大浑浊带作过比较深入的研究,但有关营养盐的研究未见报道。作者运用 2003~2004 年 4 个航次的调查资料,对长江口最大浑浊带及邻近水域水体中营养盐(N, P, Si)的含量及分布特征进行了讨论,为长江口最大浑浊带的生物地球化学研究提供基础资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

本项研究于 2003 年 11 月、2004 年 2 月、5 月和 8 月对长江口海区进行 4 个季度月的现场调查,共设 20 个调查站位(图 1),调查内容包括化学耗氧量

(COD)、硝酸盐(NO<sub>3</sub>-N)、亚硝酸盐(NO<sub>2</sub>-N)、氨氮(NH<sub>4</sub>-N)、活性硅酸盐(SiO<sub>3</sub>-Si)、活性磷酸盐(PO<sub>4</sub>-P)。用不锈钢颠倒采水器采样,根据水深情况,取表层、5、10、20、30 m、底层水样。5 项营养盐水样经 whatman GF/F 膜过滤后加 0.3% 的氯仿固定,所有水样都储存于聚乙烯瓶中,立即于低温冰箱内保存,带回实验室后测定。

### 1.2 测定方法

COD 用碱性高锰酸钾法测定,NO<sub>3</sub>-N 用镉铜还原法,NO<sub>2</sub>-N 用重氮偶氮法,NH<sub>4</sub>-N 用靛酚蓝法,PO<sub>4</sub>-P 用磷钼蓝法,SiO<sub>3</sub>-Si 用硅钼蓝法,各项营养盐用荷兰产 SKALAR San & plus 微量自动分析系统分析。NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 之和为总溶解无机氮(DIN)。

收稿日期:2006-01-26;修回日期:2006-05-30

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50339040);中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-232);国务院三峡工程建设委员会资助项目(SX2004-010)

作者简介:周淑青(1980-),女,河北沧州人,硕士,研究方向为水域生态学,E-mail:sqzhou@stmail.shfu.edu.cn;沈志良,通讯作者,研究员,博士生导师,E-mail:zhshen@ms.qdio.ac.cn

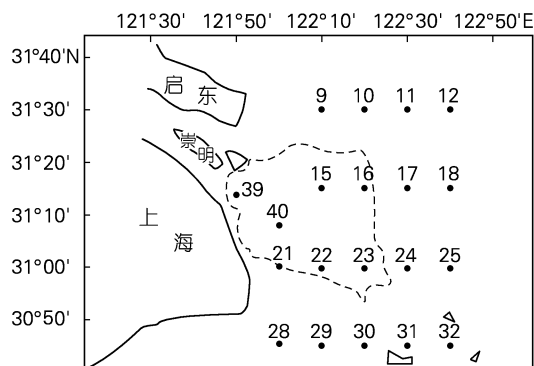


图1 长江口采样站位(虚线区域为最大浑浊带<sup>[11]</sup>)

Fig. 1 Sampling stations in the Changjiang Estuary (The area of broken line is a maximum turbidity zone)

## 2 结果与讨论

### 2.1 营养盐的平面分布和季节变化

#### 2.1.1 平面分布

从整个调查海区与最大浑浊带表层营养盐浓度平均值(表1)可以看出,除2月份  $PO_4\text{-P}$  浓度基本相当外,各项营养盐的浓度均为最大浑浊带高于整个调查海域,这是因为最大浑浊带位于长江入海的口门区及其外围水域,长江淡水带来了大量的营养盐。

从营养盐含量的平面分布(图2~图6)可以看出,整个调查海区水体中营养盐的浓度总体上随着离岸高的增加逐渐减小,表明它们主要来源于河水。

从图2可以看出,整个调查海域  $PO_4\text{-P}$  的分布一

般是河口附近高,外海较低,其中以8月份最为显著。11月份,表层  $PO_4\text{-P}$  浓度在口门附近形成一个高值区,浓度从河口向东部和东北部逐渐递减;底层在122°20'E以东  $PO_4\text{-P}$  由北向南先降低后又升高,在122°20'E以西浓度小于  $0.8 \mu\text{mol/L}$ 。2月,表层  $PO_4\text{-P}$  浓度由口门向东南逐渐减小,在偏南部形成一个低值区,低值区以南浓度有所增加;底层在口门附近形成高值区,可能由于2月再悬浮泥沙含量较高<sup>[2]</sup>,部分  $PO_4\text{-P}$  被释放。5月,表层  $PO_4\text{-P}$  在23号站和40号站与21号站之间出现两个低值区,各站位的悬浮体质量浓度,21号站最高为  $291.3 \text{ mg/L}$ ,40号站次之为  $92.4 \text{ mg/L}$ ,23号站为  $69.2 \text{ mg/L}$ ,且这一水域光照条件较差,各站透明度分别为  $0.8, 0.6, 0.5 \text{ m}$ ,浮游植物量少,叶绿素a质量浓度分别为  $0.221, 0.125$  和  $0.227 \mu\text{g/L}$ ,由此可以推断该水域  $PO_4\text{-P}$  浓度低,除生物活动少量消耗外,可能与部分  $PO_4\text{-P}$  被悬浮泥沙吸附沉积有关。许多学者已经证明河口大量的悬浮颗粒物从富  $PO_4\text{-P}$  水中吸附  $PO_4\text{-P}$ ,同时把  $PO_4\text{-P}$  送回到低  $PO_4\text{-P}$  水中<sup>[3]</sup>。在23号站低值区的北面16号站附近,  $PO_4\text{-P}$  形成一高值区,该站位叶绿素a质量浓度为  $0.722 \mu\text{g/L}$ ,低于整个调查海域的平均值,悬浮体质量浓度也较低为  $10.7 \text{ mg/L}$ ,表明该水域  $PO_4\text{-P}$  生物消耗少,悬浮体影响也较小。8月,表、底层分布较一致,在口门外形成一个高值区,浓度由西向东降低,8月高浓度范围扩展较大。整体来看,  $PO_4\text{-P}$  的分布较其它营养盐复杂,这显然与  $PO_4\text{-P}$  在河口的缓冲机制密切相关。

表1 整个调查海区与最大浑浊带表层营养盐浓度平均值( $\mu\text{mol/L}$ )

Tab.1 Average nutrient concentrations in the surface water in the whole observation area and maximum turbidity zone ( $\mu\text{mol/L}$ )

月份	整个调查海区			最大浑浊带		
	$PO_4\text{-P}$	$SiO_3\text{-Si}$	DIN	$PO_4\text{-P}$	$SiO_3\text{-Si}$	DIN
11	$0.63 \pm 0.30$	$107.5 \pm 33.2$	$41.5 \pm 18.9$	$0.87 \pm 0.31$	$139.5 \pm 27.4$	$54.6 \pm 5.2$
2	$0.79 \pm 0.18$	$48.4 \pm 30.8$	$44.5 \pm 38.1$	$0.76 \pm 0.26$	$67.7 \pm 34.4$	$73.4 \pm 43.3$
5	$0.75 \pm 0.28$	$44.0 \pm 22.3$	$49.7 \pm 27.8$	$0.89 \pm 0.36$	$69.8 \pm 22.3$	$77.4 \pm 33.4$
8	$0.92 \pm 0.43$	$97.8 \pm 36.6$	$50.0 \pm 20.6$	$1.2 \pm 0.51$	$128.1 \pm 19.6$	$68.0 \pm 14.3$
平均	$0.78 \pm 0.32$	$74.3 \pm 41.8$	$46.5 \pm 27.1$	$0.93 \pm 0.39$	$101.2 \pm 42.0$	$68.2 \pm 28.4$

$SiO_3\text{-Si}$  的分布是河口及附近高,向外海逐渐降低,等值线分布与盐度的分布趋势相反,浓度梯度较大(图3)。11月,表层  $SiO_3\text{-Si}$  呈舌状向东延伸,底层  $SiO_3\text{-Si}$  偏向东南。2月,表、底层等值线分布基本上与海岸线平行,浓度由西向东逐渐降低。5月,表层  $SiO_3\text{-Si}$  在中部16号站附近形成一高值区,这与

$PO_4\text{-P}$  的高值区一致,  $55 \mu\text{mol/L}$  的等值线向东延伸至  $122^\circ 30' E$ ;底层分布较规则,由西向东逐渐降低。8月,表、底层  $SiO_3\text{-Si}$  浓度由口门向东、向南逐渐降低,东南部水域为低含量区,主要由于外海水团影响所致。 $SiO_3\text{-Si}$  等值线的季节变化清楚地表明长江径流对其影响,11月份,  $105 \mu\text{mol/L}$  的等值线在

122°30'E附近;2月份,105 μmol/L的等值线退缩到河口附近;5月,整个海域 SiO<sub>3</sub>-Si 的浓度较低,这显然与河口内 SiO<sub>3</sub>-Si 浓度低有关;8月,110 μmol/L 的等值线延伸到 122°30'E 以外。大陆径流的输入是决定海洋中 SiO<sub>3</sub>-Si 浓度的主要因素。从调查结果可以看出,底层 SiO<sub>3</sub>-Si 的浓度梯度较表层小,平均浓度也低。

NO<sub>3</sub>-N 的分布趋势为河口及附近高,向外逐渐降低,浓度随盐度的增加而减小,与 SiO<sub>3</sub>-Si 的分布相似(图 4)。11月份,NO<sub>3</sub>-N 表层 50 μmol/L 的等值线呈舌状延伸到 122°40'E 附近,在东部形成一高值区,然后向北向东南降低;底层则向东部逐渐降低。2月份,表、底层 NO<sub>3</sub>-N 与 SiO<sub>3</sub>-Si 分布几乎一致,浓度自西向东逐渐降低。5月份,表层由口门向东逐渐降低;底层与表层基本相似。8月份,表层浓度由口门向外海逐渐降低,65 μmol/L 的等值线呈舌状向东延

伸,与 SiO<sub>3</sub>-Si 的分布相类似;底层由口门向东逐渐降低。NO<sub>2</sub>-N 是三态无机氮的中间产物,不稳定,含量低。从图 5 可以看出,11月,NO<sub>2</sub>-N 表层浓度由西南向东北升高,底层与表层相似。2月,表、底层 NO<sub>2</sub>-N 浓度均由河口向外逐渐降低。5月,表层 NO<sub>2</sub>-N 浓度由口门向东和东南方向降低,底层也有类似分布。8月,表、底层 NO<sub>2</sub>-N 分布非常相似,在口门附近形成一高值区,然后向外海浓度降低,底层浓度低于表层。NH<sub>4</sub>-N 的含量除受长江冲淡水的很大影响外,受生物活动影响也较大,因此其分布较复杂(图 6)。2月和5月 NH<sub>4</sub>-N 分布比较规则,浓度随盐度的增加而减小,2月份浓度明显较高。11月和8月 NH<sub>4</sub>-N 分布较复杂,11月,浓度西北部高,东南部低;8月,河口附近高,外海较低。

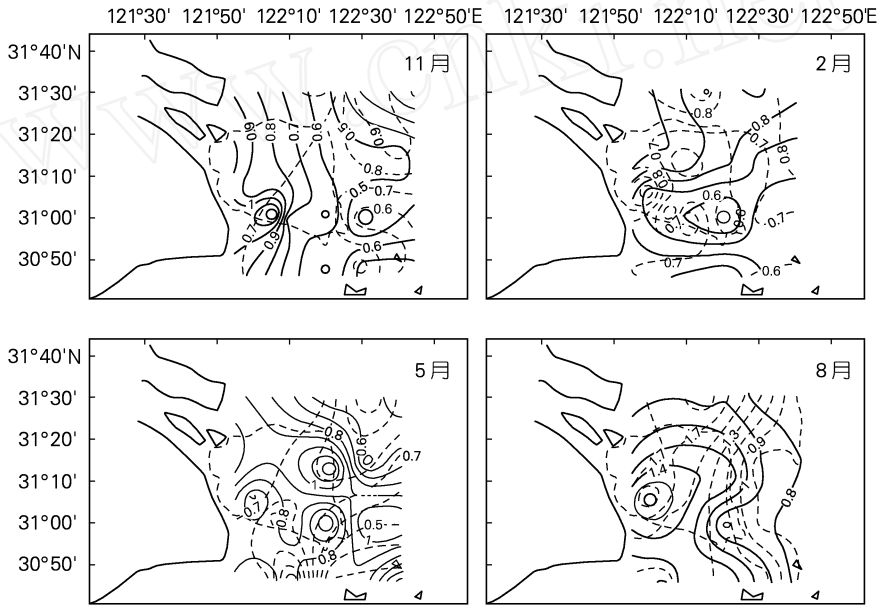


图 2 PO<sub>4</sub>-P 浓度(μmol/L)的平面分布(—表层, 底层)

Fig. 2 Horizontal distributions of PO<sub>4</sub>-P concentration(μmol/L, —surface, bottom)

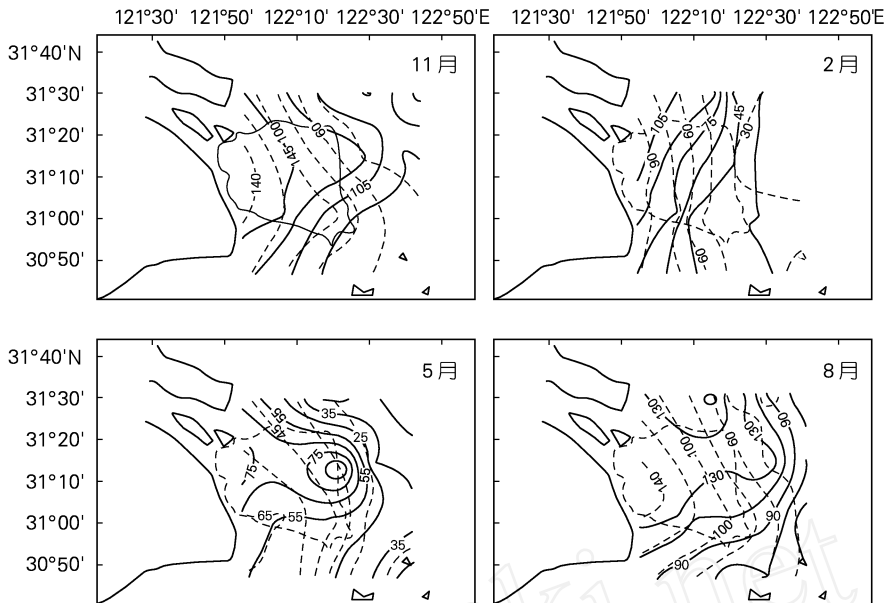


图3  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  浓度( $\mu\text{mol/L}$ )的平面分布(—表层, 底层)

Fig. 3 Horizontal distributions of  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  concentration( $\mu\text{mol/L}$ , —surface, bottom)

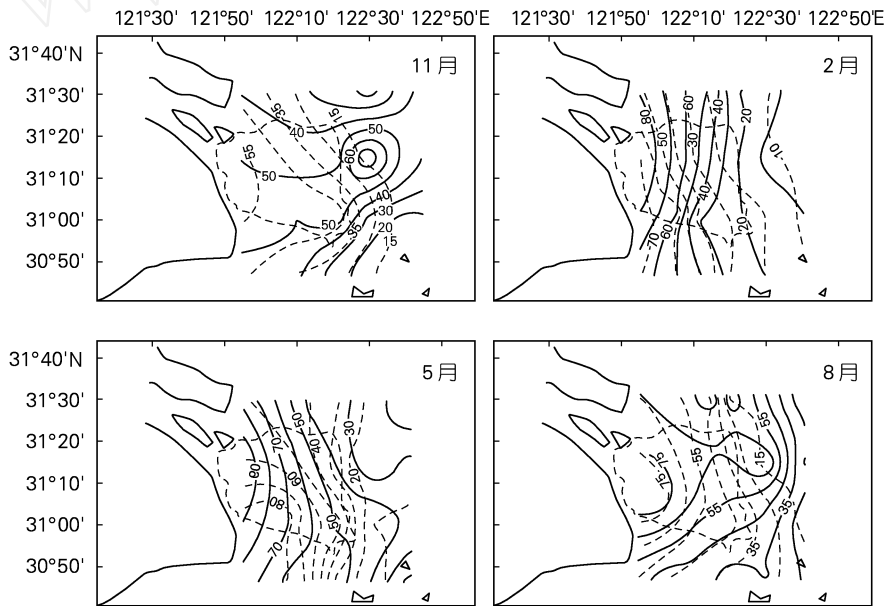


图4  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度( $\mu\text{mol/L}$ )的平面分布(—表层, 底层)

Fig. 4 Horizontal distributions of  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentration( $\mu\text{mol/L}$ , —surface, bottom)

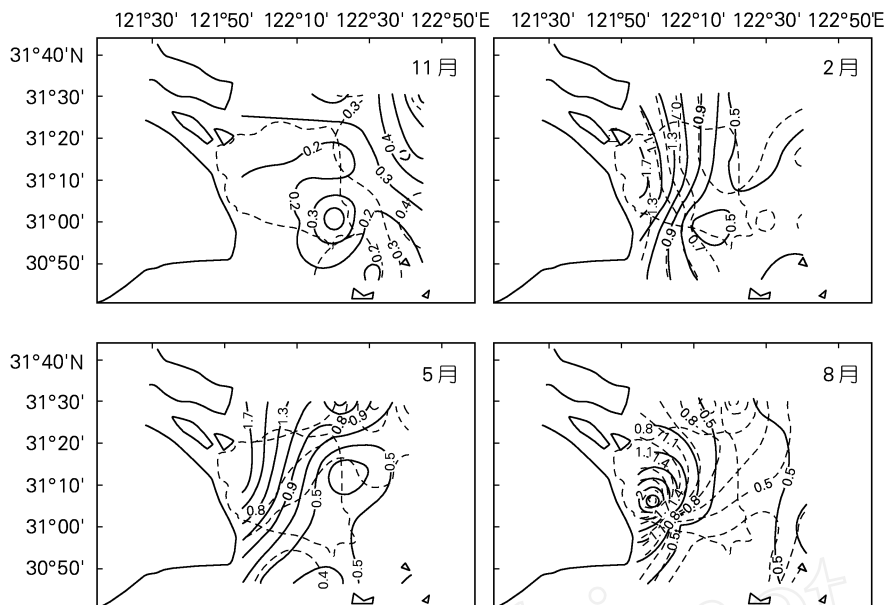


图5 NO<sub>2</sub>-N 浓度(μmol/L)的平面分布(—表层, 底层)

Fig. 5 Horizontal distributions of NO<sub>2</sub>-N concentration (μmol/L, —surface, bottom)

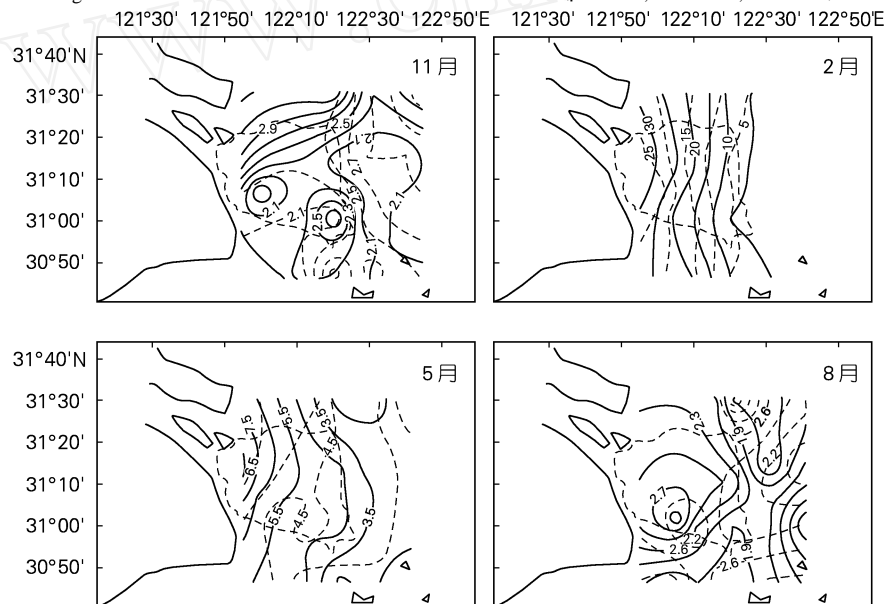


图6 NH<sub>4</sub>-N 浓度(μmol/L)的平面分布(—表层, 底层)

Fig. 6 Horizontal distributions of NH<sub>4</sub>-N concentration (μmol/L, —surface, bottom)

### 2.1.2 季节变化

整个调查海域表层营养盐和叶绿素 a 平均浓度的季节变化(图 7a)表明,春、夏季长江流量增加时, PO<sub>4</sub>-P 和 NO<sub>3</sub>-N 浓度亦较高,8 月达到最高,但夏季叶绿素 a 的含量不是全年最高,由此可知,PO<sub>4</sub>-P 和

NO<sub>3</sub>-N 浓度与浮游植物的消长关系并不明显。PO<sub>4</sub>-P 浓度在 11 月份最低,NO<sub>3</sub>-N 浓度在 2 月份最低。总体看来,PO<sub>4</sub>-P 浓度全年变化不大。SiO<sub>3</sub>-Si 浓度在 11 月份最高,5 月份最低,季节变化趋势与 1985 ~ 1986 年调查相似<sup>[4]</sup>。NO<sub>2</sub>-N 浓度全年都很

低,总的变化是2月份最高,11月份最低。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度也是2月份最高,最低在8月份。有研究表明, $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度与长江流量呈线性负相关关系<sup>[4]</sup>。调查海域叶绿素 a 的季节变化为5月 > 11月 > 8月 > 2月。

最大浑浊带表层营养盐和叶绿素 a 平均浓度的季节变化(图7b)与整个调查水域稍有不同。 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度8月份最高,2月份最低。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度则是5月

份最高,11月份最低。 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度在11月份最高,2月最低。 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度变化与整个调查水域相同。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的浓度为2月份最高,11月最低,8月也很低。最大浑浊带与整个调查水域营养盐浓度季节变化的差异除了受悬浮体含量的影响外,与浮游植物分布上的差异也有关,最大混浊带叶绿素 a 的季节变化是8月 > 11月 > 2月 > 5月。

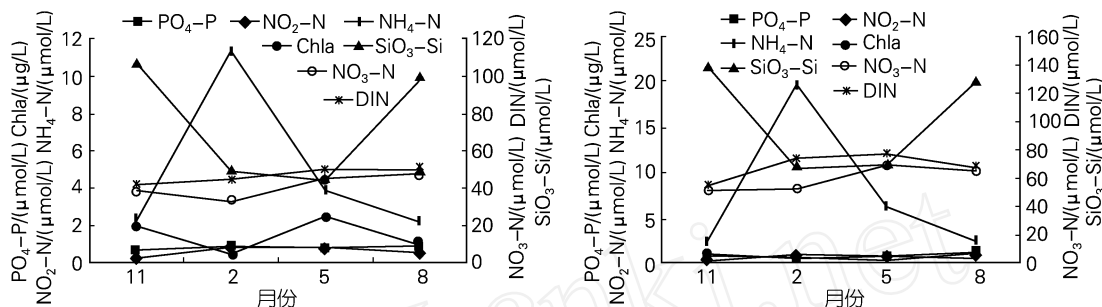


图7 表层营养盐和叶绿素 a 平均浓度的季节变化

Fig. 7 Seasonal changes of average nutrients and Chl-a contents in the the surface water

a. 整个调查海域; b. 最大浑浊带

a. Whole observation area; b. Maximum turbidity zone

## 2.2 营养盐结构

### 2.2.1 营养盐的摩尔比

海水中适宜的 N/P、Si/P 和 Si/N 比有利于浮游植物的生长和繁殖,反之,其中某种营养盐的缺乏将限制生物的生长和繁殖。Sharp<sup>[5]</sup>在对 Delaware 河口研究时认为,营养盐比值及某些物理条件对河口区富营养化的调控较单一营养盐负荷或浓度显得更重要。N/P、Si/P 和 Si/N 比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。

从四个季节营养盐的摩尔比(表2)可以看出,整个调查海域  $\text{DIN}/\text{PO}_4\text{-P}$  比值5月最高,2月最低;而最大浑浊带是2月最高,8月最低。在整个调查海域和最大浑浊带, $\text{SiO}_3\text{-Si}/\text{PO}_4\text{-P}$  和  $\text{SiO}_3\text{-Si}/\text{DIN}$  比值季节变化相同,都是11月最高,5月最低。比较各季节的营养盐比例, $\text{DIN}/\text{PO}_4\text{-P}$  和  $\text{SiO}_3\text{-Si}/\text{PO}_4\text{-P}$  比值都是最大浑浊带明显高于整个调查海区,而  $\text{SiO}_3\text{-Si}/$

$\text{DIN}$  比值则相反,这与最大浑浊带的位置有关。在各项营养盐比例中, $\text{DIN}/\text{PO}_4\text{-P}$  和  $\text{SiO}_3\text{-Si}/\text{PO}_4\text{-P}$  比值远高于 Redfield 比值<sup>[6]</sup>,这是受长江冲淡水高含量 Si 和 N 的影响,表明在整个调查海域 P 极可能成为浮游植物潜在性的限制因子。最大混浊带由于悬浮泥沙含量较高,透明度较低,11月,几乎所有站位为 0 m,2月 和 5月,平均分别为 0.1 m 和 0.6 m,8月,所有站位均为 0 m。所以,在最大浑浊带,与 P 相比,透明度更有可能成为该水域浮游植物的主要限制因素,这与过去的调查也是一致的<sup>[7]</sup>。 $\text{SiO}_3\text{-Si}/\text{DIN}$  比值比较接近 Redfield 比值,其平均值除 11月大于 2外,其它季节都小于 2。 $\text{SiO}_3\text{-Si}/\text{PO}_4\text{-P}$  和  $\text{SiO}_3\text{-Si}/\text{DIN}$  比值的季节变化相一致,都是 11月 > 8月 > 2月 > 5月,这和  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  的季节变化一致,说明它们主要受  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  的影响。最大浑浊带  $\text{DIN}/\text{PO}_4\text{-P}$  比值的季节变化是 2月 > 5月 > 11月 > 8月,这是因为最大浑浊带  $\text{PO}_4\text{-P}$  浓度 8月最高,2月最低,而  $\text{DIN}$  浓度 2月高于 8月。

表 2 整个调查海区和最大浑浊带营养盐的摩尔比

Tab. 2 The ratios of nutrients in the whole observation sea area and maximum turbidity zone

月份	整个调查海区			最大浑浊带		
	DIN/ PO <sub>4</sub> -P	SiO <sub>3</sub> -Si/ PO <sub>4</sub> -P	SiO <sub>3</sub> -Si / DIN	DIN/ PO <sub>4</sub> -P	SiO <sub>3</sub> -Si/ PO <sub>4</sub> -P	SiO <sub>3</sub> -Si / DIN
11	50.1 ±68.0	135.8 ±181.3	3.0 ±0.88	73.4 ±20.1	180.1 ±56.6	2.5 ±0.55
2	47.5 ±43.9	58.6 ±39.1	1.6 ±0.64	97.4 ±50.7	97.5 ±48.7	1.1 ±0.27
5	53.6 ±33.7	49.5 ±23.7	1.0 ±0.33	95.5 ±37.4	78.2 ±20.2	0.93 ±0.45
8	48.5 ±25.7	96.3 ±51.5	2.0 ±0.31	58.1 ±24.9	110.4 ±50.7	1.9 ±0.16
平均	50.0 ±44.7	84.0 ±99.7	1.9 ±0.90	82.7 ±39.9	110.9 ±56.2	1.5 ±0.70

### 2.2.2 无机氮的形态特征

海水中的无机 N 包括 NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 三种形态,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>[8]</sup>。从三态无机 N 的比例(表 3)可以看出长江口最大浑浊带及邻近水域无机氮的主要存在形式是 NO<sub>3</sub>-N。这与以 NH<sub>4</sub>-N<sup>[9]</sup>为主要形态的半封闭型的胶州湾完全不同,长江口是一个开放型海域,水体交换条件好,无机氮已经充分达到热力学平衡。最大浑浊带 NO<sub>3</sub>-N/DIN 比较整个水域值更高,除 2 月份外,其它都在

90%以上,NO<sub>2</sub>-N/DIN 和 NH<sub>4</sub>-N/DIN 比较小,反映了最大浑浊带无机 N 的硝化作用进行得更为充分。从表 3 可以看出,NO<sub>3</sub>-N/DIN 比 8 月较高,2 月份较低,而 NO<sub>2</sub>-N/DIN 和 NH<sub>4</sub>-N/DIN 比则是 2 月最高,8 月较低,这与长江的情况是一致的,夏季温度高,长江径流量大,有利于 NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 进一步氧化<sup>[10]</sup>。据报道,上海城市污水中的溶解无机氮主要以 NH<sub>4</sub>-N 为主,在由长江口向东海输送过程中部分 NH<sub>4</sub>-N 可通过硝化反应转化为 NO<sub>3</sub>-N<sup>[11]</sup>,而且这种硝化反应随温度的增加而加强<sup>[12]</sup>。

表 3 3 种形态 N 与无机 N 总量的比值

Tab. 3 The ratios of three forms N in DIN

月份	NO <sub>3</sub> -N/ DIN		NO <sub>2</sub> -N/ DIN		NH <sub>4</sub> -N/ DIN	
	整个调查区	最大浑浊带	整个调查区	最大浑浊带	整个调查区	最大浑浊带
11	0.863	0.954	0.014	0.004	0.122	0.042
2	0.733	0.739	0.032	0.014	0.235	0.247
5	0.824	0.907	0.026	0.010	0.150	0.083
8	0.894	0.951	0.021	0.012	0.085	0.037
平均	0.830	0.873	0.023	0.011	0.147	0.116

### 2.3 营养盐在河口的转移

对整个调查海域水体中所有水层营养盐与盐度(S)进行相关统计(表 4),可以看出,各月 SiO<sub>3</sub>-Si 和 NO<sub>3</sub>-N 与 S 呈显著的负相关关系,表明整个调查水域 SiO<sub>3</sub>-Si 和 NO<sub>3</sub>-N 的分布主要受控于河水和海水的物理混合作用。浮游植物在上层摄取部分营养盐,在下层,有机体分解,营养盐再生。因此,NO<sub>3</sub>-N 和 SiO<sub>3</sub>-Si 的转移除了海水稀释作用外,还受生物活动的影响。此外,悬浮体吸附、沉积物再悬浮释放等对营养盐在河口的转移也有一定的影响。由于 NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 受诸多因素的影响,它们与 S 的关系较复杂,相关性也较差。

PO<sub>4</sub>-P 与 S 之间在 11 月份基本没有相关性,2,5 月呈较显著的负相关性,8 月份负相关性显著,但较 SiO<sub>3</sub>-Si 和 NO<sub>3</sub>-N 与 S 的相关性差,这是由于 PO<sub>4</sub>-P 在河口除了物理混合过程和生物转移外,还存在着其它转移过程,如悬浮体的吸附、释放,沉积物再悬浮、再释放等。长江年平均输沙量达 4.86 ×10<sup>8</sup>t,占全世界河流入海悬沙总量的 2.7%<sup>[11]</sup>。长江入海的悬浮泥沙由于风力、潮汐和海流等水动力因素影响,经常处于运动状态,沉积-悬浮-再沉积-再悬浮过程,随季节而变化,这就加速了 PO<sub>4</sub>-P 在水、悬浮颗粒物和沉积物之间的交换,有助于其在水体中的含量保持一定的水平,从而维持浮游植物生长的需要<sup>[4]</sup>。王芳<sup>[13]</sup>

等报道悬浮物中生物可利用磷对长江流域、河口及近海区营养盐的贡献是不容忽视的,颗粒态磷是长江河口及近海区富营养化的潜在污染源。

在最大浑浊带,虽然浮游植物量少,但它的悬浮泥沙含量较高,因此各项营养盐与 *S* 之间的相关性

明显不如整个调查海域。如各季度月  $PO_4\text{-P}$  和  $SiO_3\text{-Si}$  与 *S* 之间的相关性显著性水平 *P* 值分别介于  $0.721 \sim 0.130$  和  $0.054 \sim 1.78 \times 10^{-6}$  之间,可见最大浑浊带对营养盐的迁移有重要影响,特别是  $PO_4\text{-P}$  与 *S* 之间几乎没有相关性。

表 4 营养盐与盐度的相关性

Tab.4 The correlation of nutrients and salinity

月份	$PO_4\text{-P}$		$SiO_3\text{-Si}$		$NO_3\text{-N}$		$NO_2\text{-N}$		$NH_4\text{-N}$	
	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
11	0.185	0.198	-0.963	$4.91 \times 10^{-29}$	-0.886	$1.29 \times 10^{-17}$	-0.161	0.265	0.277	0.051
2	-0.274	0.054	-0.945	$6.78 \times 10^{-25}$	-0.944	$7.57 \times 10^{-25}$	-0.720	$3.93 \times 10^{-9}$	-0.947	$2.27 \times 10^{-25}$
5	-0.286	0.031	-0.882	$1.22 \times 10^{-19}$	-0.828	$1.91 \times 10^{-15}$	-0.220	0.100	-0.627	$1.77 \times 10^{-7}$
8	-0.363	0.006	-0.915	$6.27 \times 10^{-23}$	-0.919	$1.96 \times 10^{-23}$	-0.291	0.030	0.124	0.362

### 2.4 富营养化的初步评价

由调查数据统计,整个调查海域所有水层各项参数的年平均浓度及变化范围分别如下:DIN 为  $34.6 \mu\text{mol/L}$ ,  $5.1 \sim 145.9 \mu\text{mol/L}$ ;  $PO_4\text{-P}$  为  $0.75 \mu\text{mol/L}$ ,  $0.10 \sim 2.1 \mu\text{mol/L}$ ; COD 为  $1.45 \text{ mg/L}$ ,  $0.25 \sim 4.22 \text{ mg/L}$ 。其中最大浑浊带各项参数的年平均浓度, DIN 为  $67.5 \mu\text{mol/L}$ ,  $PO_4\text{-P}$  为  $0.91 \mu\text{mol/L}$ , COD 为  $2.37 \text{ mg/L}$ 。

根据日本水营的营养指数计算公式<sup>[14]</sup>:

$$E = \frac{c(\text{COD}) \times c(\text{DIN}) \times c(\text{DIP})}{4500} \times 10^6$$

式中, *c*(COD) 为 COD 质量浓度; *c*(DIN) 为 DIN 的质量浓度; *c*(DIP) 为 DIP 的质量浓度, 单位均为  $\text{mg/L}$ 。

当 *E* > 1 时表示水域已经呈现富营养化特征。计算结果表明, 整个调查海域的平均营养指数为 3.6; 最大浑浊带为 14, 是整个调查海域的 3.9 倍。

综上所述, 整个调查海域富营养化现象较严重, 特别是最大浑浊带, 富营养化更为严重。

### 3 结语

由上述分析结果可知:(1) 营养盐的含量总体上随着盐度的增加而减小, 表明它们主要来源于河水。 $SiO_3\text{-Si}$  与  $NO_3\text{-N}$  的分布较规则, 与盐度的相关性显著。 $PO_4\text{-P}$  由于在河口的缓冲机制, 分布较为复杂。(2) 各项营养盐具有明显的季节变化特点。(3) 比较整个调查海域, 最大浑浊带具有高的营养盐浓度, 较高的  $DIN/PO_4\text{-P}$  和  $SiO_3\text{-Si}/PO_4\text{-P}$  比 (远高于 Redfield 比), 相对低的  $SiO_3\text{-Si}/DIN$  比。在整个调查海域 *P* 是浮游植物潜在性的限制因子; 在最大混浊带, 透明度是浮游植物的主要限制因素。(4) 整个调

查海域  $NO_3\text{-N}$  是无机氮的主要形式,  $NO_3\text{-N}/DIN$  比全年平均在 83% 以上, 最大浑浊带  $NO_3\text{-N}/DIN$  比更高, 表明无机氮的硝化作用进行得更为充分。(5) 营养盐在最大浑浊带及邻近水域的转移, 主要受海水稀释控制, 还有部分生物转移, 悬浮颗粒物和沉积物的影响也不可忽视, 特别是  $PO_4\text{-P}$ , 这种影响在最大浑浊带更为明显。(6) 整个调查海域富营养化现象较严重, 最大浑浊带营养指数高达 14, 富营养化更为严重。

致谢: 调查海域盐度数据由张启龙研究员提供, 悬浮体数据由张铭汉副研究员提供, 叶绿素 *a* 数据由张芳硕士提供, 谨致谢忱。

#### 参考文献:

- [1] 沈焕庭, 潘定安. 长江河口最大浑浊带 [M]. 北京: 海洋出版社, 2001.
- [2] 陈沈良, 张国安, 杨世伦, 等. 长江口水域悬沙浓度时空变化与泥沙再悬浮 [J]. 地理学报, 2004, 59(2): 260-266.
- [3] Butler E I, Tibbitts S. Chemical survey of the Tamar estuary I. Properties of the waters [J]. *J Mar Biol Ass U K*, 1972, 52: 681-699.
- [4] 沈志良, 陆家平, 刘兴俊, 等. 长江口区营养盐的分布特征及三峡工程对其影响 [A]. 中国科学院海洋研究所. 海洋科学集刊 [C]. 北京: 科学出版社, 1992. 109-129.
- [5] Sharp J H. Long term nutrient trends and phytoplankton response in Delaware Estuary. USA [M]. Dallas: Crown Press, 2003.
- [6] Redfield A C, Ketchum B H, Richards F A, The influence of organisms on the composition seawater [A]. Hill M N. The Sea (vol. 2) [C]. New York:



- John Wiley, 1963. 22-77.
- [7] 沈志良. 长江口海区理化环境对初级生产力的影响 [J]. 海洋湖沼通报, 1993, 1: 47-51.
- [8] 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.
- [9] Shen Zhi-Liang. Historical changes in nutrient structure and its influences on phytoplankton composition in Jiaozhou Bay [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2001, 52: 211-214.
- [10] 沈志良, 刘群, 张淑美. 长江无机氮的分布变化和迁移 [J]. 海洋与湖沼, 2003, 34(4): 355-363.
- [11] 侯立军, 刘敏, 许世远, 等. 长江河口近岸水体自然净化作用及其初步评价 [J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(3): 245-249.
- [12] Sierra J. Nitrogen mineralization and nitrification in a tropical soil: effects of fluctuating temperature conditions [J]. *Soil Biol Biochem*, 2002, 34: 1 219-1 226.
- [13] 王芳, 晏维金. 长江输送颗粒态磷的生物可利用性及其环境地球化学意义 [J]. 环境科学学报, 2004, 24(3): 418-412.
- [14] 冈市友利. 浅海的污染与赤潮的发生、内湾赤潮的发生机制 [R]. [s.l.]: 日本水产资源保护协会, 1972, 58-76.

## Distribution features of nutrients in the maximum turbid zone of the Changjiang estuary and its adjacent sea areas

ZHOU Shu-qing<sup>1</sup>, SHEN Zhi-liang<sup>2</sup>, LI Zheng<sup>1</sup>, YAO Yun<sup>2</sup>

(1. Life Sciences and Technique College, Shanghai Fishery University, Shanghai 200090, China; 2. The Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Received: Jan. , 26, 2006

**Key words**: nutrient; distribution feature; maximum turbid zone; the Changjiang estuary

**Abstract**: Based on the observation data during November 2003 to August 2004, the distribution features of nutrients in the maximum turbid zone and its adjacent sea areas in the Changjiang estuary were discussed. Nutrient concentrations generally decreased with the increasing of salinity and different nutrients represented different horizontal distributions and seasonal variations. Nutrients distributions of the maximum turbid zone were different from those of the whole investigation waters, due to its geographical situation, water dynamical condition, high content of suspended matter and biological activity, etc. Compared with the whole investigation waters, there were relative high nutrients concentrations and sufficient nitrification in three forms of inorganic N, high DIN/PO<sub>4</sub>-P and SiO<sub>3</sub>-Si/PO<sub>4</sub>-P ratios (far higher than the Redfield values), and relative low SiO<sub>3</sub>-Si/DIN ratio in the maximum turbid zone. Transparency was the primary limiting factor of phytoplankton in the maximum turbid zone. The removals of nutrients in the estuary show that aside from biological removal, there is an affection possibly come from suspended matter-sediment system, especially PO<sub>4</sub>-P. There was more obvious characteristic of eutrophication in the maximum turbid zone than in the whole investigation waters.

(本文编辑:张培新)