

2003 年 5 月长江口内外溶解态无机氮、磷、硅的空间分布及日变化*

高学鲁^{1,2} 宋金明¹

(1. 中国科学院海洋研究所海洋生态与环境科学重点实验室 青岛 266071; 2. 中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境动力学重点实验室 广州 510301)

提要 为了更好地了解长江流域城市化进程和三峡工程对长江口生态系统的影响及其响应,为长期观测提供参考,采用分光光度法对 2003 年 5 月 19—26 日采自长江口的水样中的溶解态无机氮、磷、硅进行了分析。结果表明,该海域营养盐的空间分布呈现出较好的规律性: $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的浓度总体上沿长江径流入海方向递减,其在淡水端的浓度 $>100 \mu\text{mol/L}$,在离岸最远的海水端附近的浓度约为 $10 \mu\text{mol/L}$; $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 沿长江径流入海方向的浓度分布则呈现出先增加后降低的特征,最高值出现在咸淡水交界面附近,分别为 130.0 、 3.14 、 31.43 和 $2.06 \mu\text{mol/L}$ 。南北方向上各种形态营养盐的浓度总体上呈现出北部海域表、底层之间差异大于南部海域的分布特征。连续观测数据显示, $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的浓度均可能在 4h 的时间里发生较大幅度的波动。在混合水区,由于水深较浅,水体混合较容易,垂直方向上各元素的浓度平均值差异不大;在水深较深的海水区,随着水深的增加, $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的浓度平均值总体上呈下降趋势, $\text{PO}_4\text{-P}$ 则相反, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 变化不大。采用营养状态质量法和潜在性富营养化标准对调查海域的营养状况进行了分析,结果均显示,调查海域在长江径流入海方向上由淡水区的高营养水平逐渐过渡到海水区的贫营养水平。由于长江口水体中各营养元素浓度时空变化显著,准确计算其入海通量难度很大,需要足够多的高时空分辨率的数据。

关键词 营养盐, 空间分布和日变化, 营养状况, 长江口

中图分类号 P731

近几十年来,随着全球工农业生产的发展,输入到近海海域中的氮、磷等营养元素与日俱增,致使许多海域呈富营养化状态,赤潮频繁发生,给世界各沿海国家造成了不同程度的损失(李学刚等, 2005; 宋金明等, 2006)。

河口区物理、化学动力学及生态关系受控于陆地淡水的输入和与邻近开阔海之间的水交换(Flindt *et al*, 1999)。长江是我国的第一大河,枯、丰水季节变化明显,每年的 5—10 月份为洪季,

径流入海量占全年的 71.3%(沈焕庭, 2001)。强大的长江径流源源不断向河口及其邻近东海及南黄海输送营养盐类,是这些海域生物生存、发展的重要物质基础。20 世纪 80 年代以来,海洋工作者对长江口附近海域的营养盐进行了大量的研究,但大多单纯研究口内或口外区域,同时研究营养盐自长江口口内至口外分布特征的工作相对较少(Edmond *et al*, 1985; 黄尚高等, 1986; 沈志良等, 1987; 沈焕庭, 2001; 傅瑞标等, 2002; 石晓勇等,

*中国科学院“百人计划”项目,科人 2003-202 号;青岛市科技将才专项计划,04-3-JJ-03、05-2-JC-90 号。高学鲁,博士, E-mail: xlgao@scsio.ac.cn

通讯作者, E-mail: jmsong@ms.qdio.ac.cn

收稿日期: 2006-01-24, 收修改稿日期: 2007-01-06

2003)。本报告旨在研究洪季初期长江径流入海过程中水体中溶解态无机氮、磷、硅的分布特征, 并对调查区该季节的营养状况进行分析, 为长期观测长江流域城市化进程和三峡工程对长江口生态系统的影响及其响应提供参考。

1 样品的采集与分析

2003 年 5 月 19—26 日, 随“浙海环监”号科学考察船对长江口海域进行了调查。本次调查的 29 个站位设置于 A、B 两个断面上(图 1)。A 断面为沿长江南支入海方向的延长线, 从枯季盐水入侵面附近(121°02 E, 31°47 N), 至长江口水下三角洲的前缘附近(123°02 E, 30°12 N), 沿线设置采样站位 20 个。为研究长江径流入海后, 咸淡水混合过程中各参数随时间的变化情况, 对 13 和 20 号站进行了 48 h 连续监测, 每 4 h 采样一次。B 断面为 122°19 E 沿线, 从 30°23 N—31°40 N, 基本涵盖了长江冲淡水作用的南北界限, 设置 9 个采样站位。

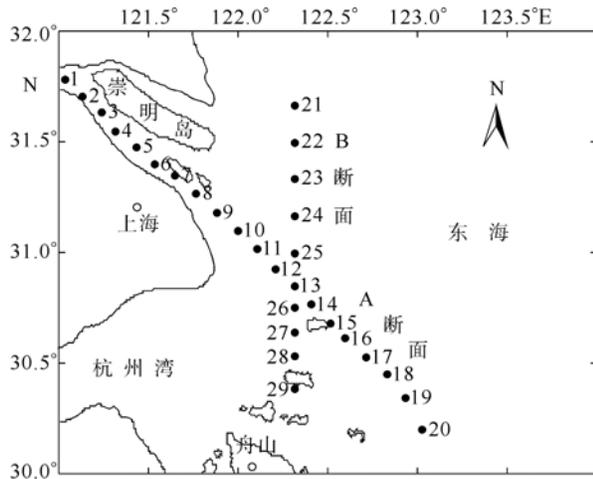


图 1 长江口采样站位图

Fig.1 Location of sampling stations in the Changjiang (Yangtze) River Estuary

根据水深的不同使用 Niskin 采水器分别采取 0 m(表层)、5 m、10 m、20 m 和离底 2 m 层的水样。对于水深小于 10 m 的站位仅对 0 m 和离底 2 m 层的水样进行了采集。盐度(S)和温度(T)数据于现场测得。水样采集后立即用孔径为 0.45 μm 的微孔滤膜进行过滤, 滤液置于-20°C 保存用于营养盐分析; 另取一定体积水样经 Whatman GF/F 滤膜过滤, 将滤膜冷冻保存用于叶绿素 a(Chl.a)分析。回陆地实验室后对 NO₃-N(铈钼还

原法)、NO₂-N(重氮偶氮法)、NH₄-N(靛酚蓝法)、PO₄-P(抗坏血酸还原的磷钼蓝法)和 SiO₃-Si(硅钼蓝法)进行测定(Grasshoff *et al*, 1983); 采用分光光度法对 Chl.a 进行分析(Lorenzen, 1967); 通过 Shimadzu TOC 5000 对水样中的总有机碳(TOC)进行测定; 按《海洋监测规范》对水样中的化学需氧量(COD)进行测定。

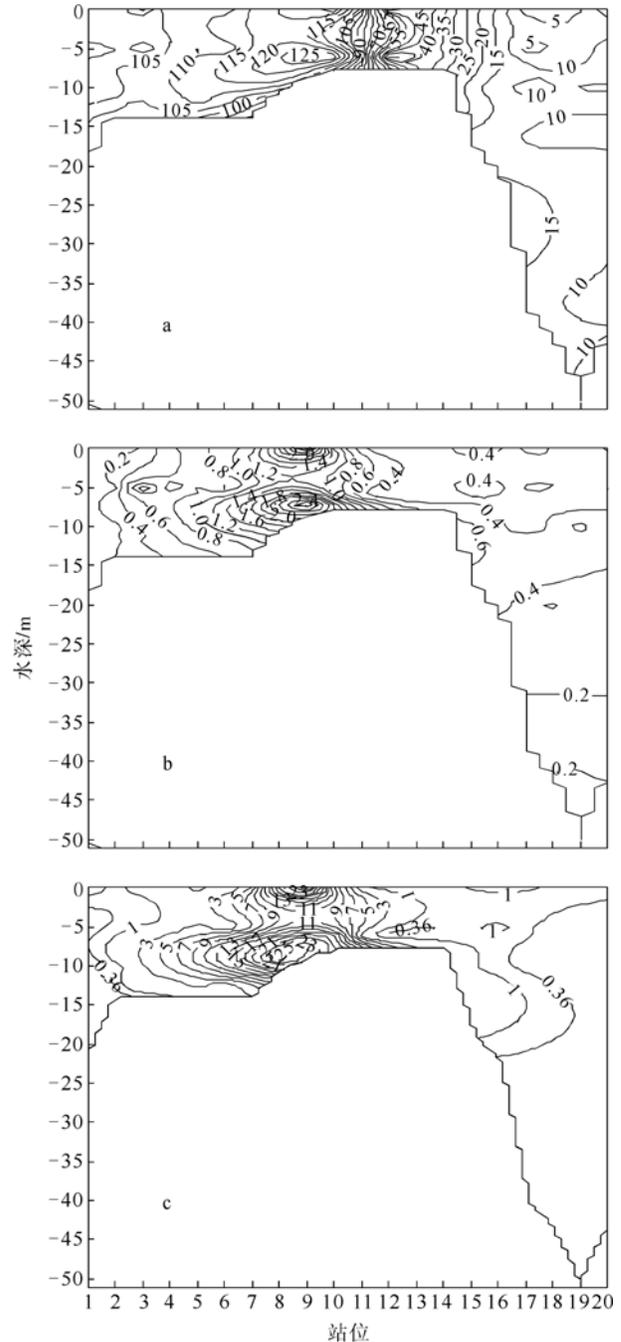


图 2 NO₃-N(a)、NO₂-N(b)和 NH₄-N(c)浓度等值线沿 A 断面分布(μmol/L)

Fig. 2 The concentration isolines of NO₃-N(a), NO₂-N(b) and NH₄-N(c) along Transect A (in μmol/L)

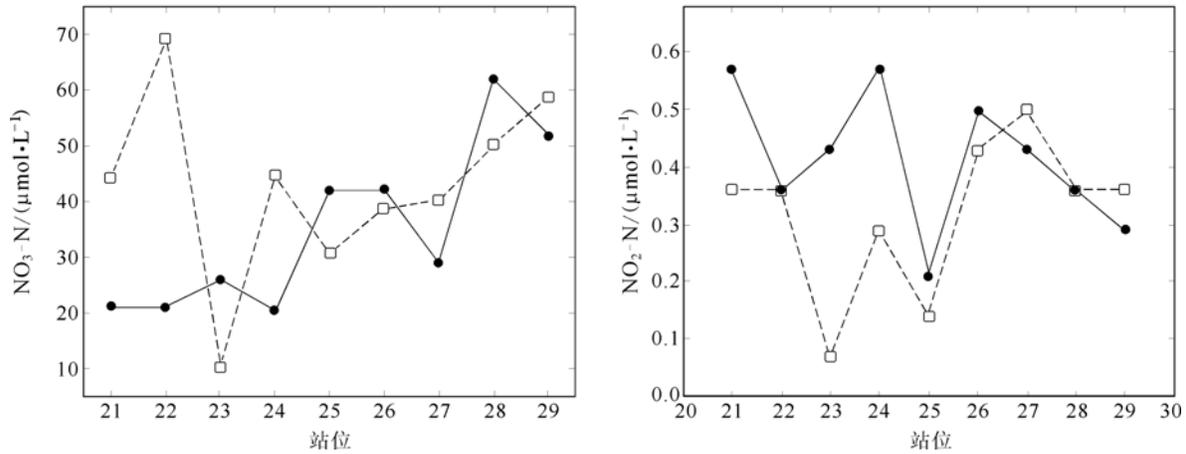


图3 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度沿 B 断面分布(—●— 离底 2m; - - - 0m; 图 4、图 7、图 8 同)

Fig.3 Spatial distributions of $\text{NO}_3\text{-N}$ and $\text{NO}_2\text{-N}$ concentration along Transect B

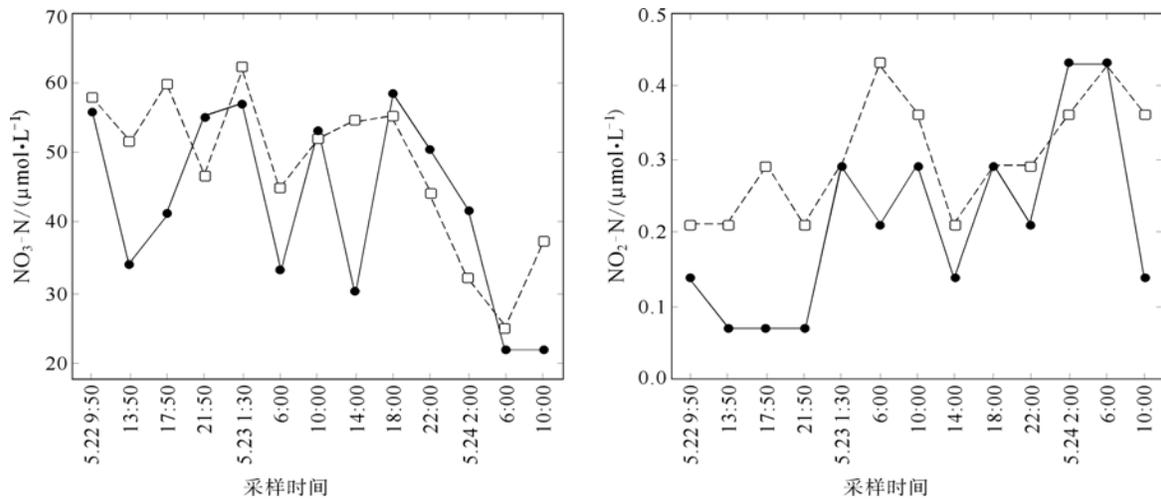


图4 13 号站各层 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度随时间的变化趋势

Fig.4 The variation trends of $\text{NO}_3\text{-N}$ and $\text{NO}_2\text{-N}$ concentrations vs. time for each layer at Station 13

(采样时间单位为: 年.月 时:分, 图 5、图 8、图 9 同)

2 结果与讨论

2.1 空间分布和日变化特征

2.1.1 无机氮 本研究中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 沿 A 断面的分布示于图 2。 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 具有相似的分布特征, 高值区出现在 6—12 号站之间, 最大值出现在位于口门的 9 号站的表层, 分别为 3.14 和 31.43 $\mu\text{mol/L}$, 占到 DIN 的 2.0 和 20.2%。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 总体上沿长江入海方向浓度随盐度的升高而显著降低, 在口门以西的水体中分布比较均匀, 到达口门前后浓度稍有增加, 而后持续降低至离岸最远的 20 号站附近的最小值。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度在 6 号站之前平均为 $105.5 \pm 5.6 \mu\text{mol/L}$, 最大值出现在 10 号站离底 2 m 层, 为 130.0 $\mu\text{mol/L}$, 和 6 号站之前平均值相比增幅为 23%。

$\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 沿 B 断面的分布示于图 3。总

体上, 北部站位 0 m 层和离底 2 m 层之间 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的浓度差异要大于南部站位, 两层之间 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度差异最大的站分别为 22 和 23 号站。位于北部的 21 至 24 号站离底 2 m 层之间 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的浓度比较接近, 显著低于其他几个站位。

河口系统中氮通过以下几种主要途径得到补充: 陆地上的点源和面源输入、大气扩散与沉降输入、生物固定(陆健健, 2003)。沈志良等(2001)的研究表明, 长江口各种形态的无机氮输出通量与长江径流量呈明显的线性正相关, 表明它们主要受径流量所控制。无机氮主要来源于降水、农业非点源化肥氮和土壤氮流失以及点源工业废水和生活污水排放, 三者分别占江口无机氮输出通量的 62.3%、18.5%和 14.4%(沈志良等, 2001)。

从 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 沿 A 断面的分布可以看出, 它们在 6—12 号站之间的最高浓度

均较 6 号站之前有不同程度的增加, 沿岸河流和排污口点源无机氮的输入及水体或沉积物中含氮有机物的分解很可能是这三种形态无机氮浓度增

加的主要原因。

13 号连续站的数据表明, $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度的日变化没有明显的规律性(图 4)。相邻的采样

表 1 13 号和 20 号连续站各层 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度的变化范围、平均值及标准偏差

Tab.1 The variation range, mean value and standard deviation of $\text{NO}_3\text{-N}$ and $\text{NO}_2\text{-N}$ concentrations for each layer at Stations 13 and 20

站号	层次	$\text{NO}_3\text{-N}$ / ($\mu\text{mol/L}$)			$\text{NO}_2\text{-N}$ / ($\mu\text{mol/L}$)		
		变化范围	平均值	标准偏差	变化范围	平均值	标准偏差
13	0 m	24.93—62.14	47.94	11.12	0.21—0.43	0.30	0.08
	离底 2 m	21.93—58.43	42.63	13.31	0.07—0.43	0.21	0.13
20	0 m	4.50—19.79	13.36	4.38	0.14—0.57	0.43	0.12
	5 m	8.00—20.14	14.41	4.23	0.21—0.57	0.41	0.09
	10 m	2.00—23.29	15.38	5.44	0.07—0.57	0.39	0.12
	20 m	1.36—20.29	12.40	6.59	0.14—0.36	0.29	0.08
	离底 2 m	6.21—14.14	10.46	1.88	0.14—0.29	0.19	0.05

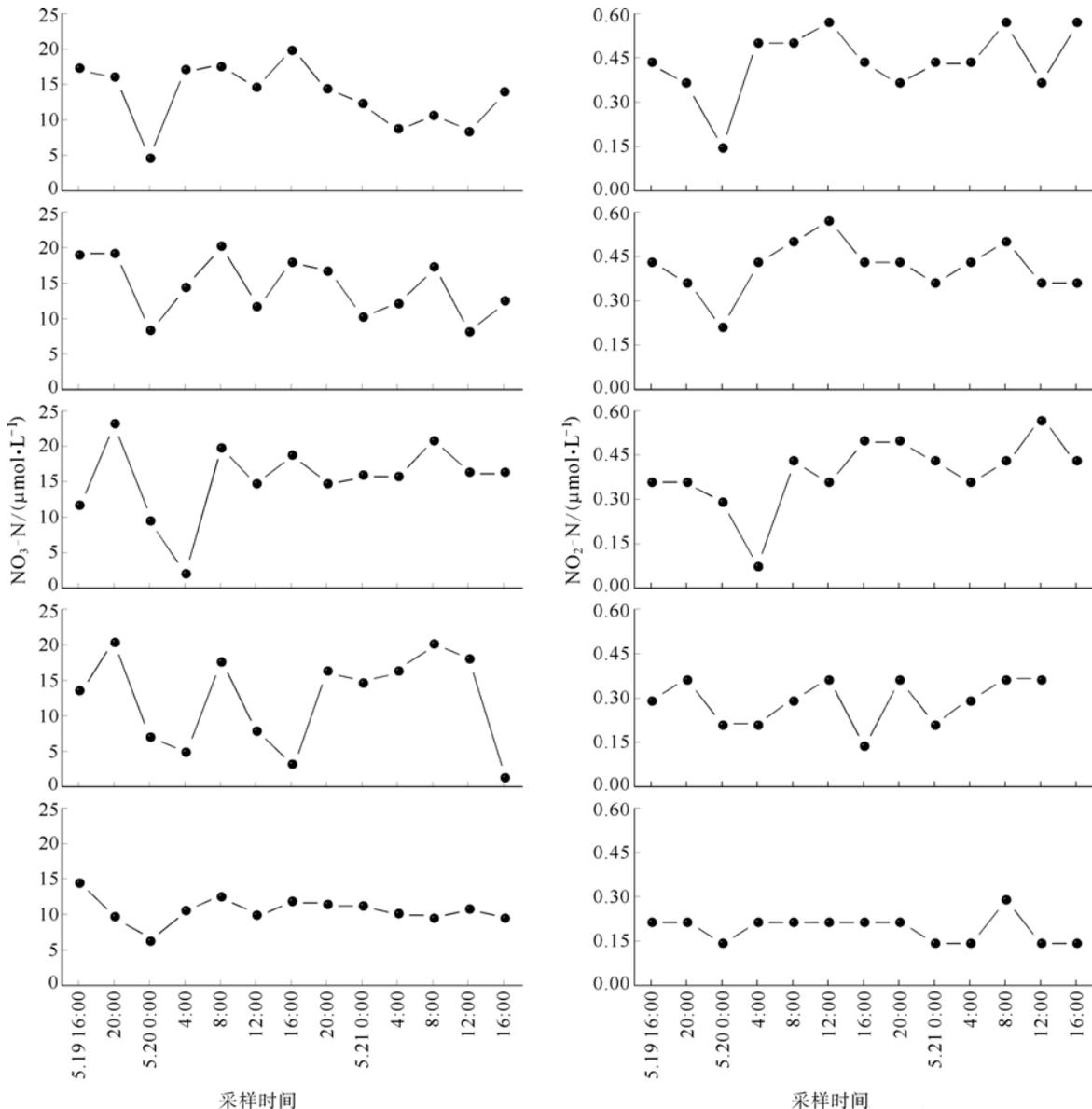


图 5 20 号站各层 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度随时间的变化趋势(图中由上至下依次为: 0 m、5 m、10 m、20 m 和离底 2 m 层)
Fig. 5 The variation trends of $\text{NO}_3\text{-N}$ and $\text{NO}_2\text{-N}$ concentrations vs. time for each layer at Station 20 (from top to bottom: 0 m, 5 m, 10 m, and 20 m from the surface, and 2 m above the bottom)

时间内各层 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的浓度均可能较大的变化。两种形态的氮在 0 m 层的平均浓度均略大于离底 2 m 层(表 1)。20 号连续站 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度的日变化也没有明显的规律性(图 5)。调查时间内, $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度波动幅度最大的层分别为 20 m 和 10 m 层; 两种形态氮的浓度波动幅度最小的层均为离底 2 m 层(表 1)。各层的平均值显示, $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度最高的层为 10 m 层, 接下来是 5 m、0 m、20 m 层, 最低的层为离底 2 m 层, 即总体上呈先增加后降低的趋势; $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度则随着深度的增加而持续降低。但对于同一采样时间所获得的 5 个样品, 两种形态氮的浓度随深度变化的规律性不强。与 13 号站相似, 从某一采样时间到另一采样时间层与层之间的变化趋势不尽相同。

对照 1998 年 7 月 1 日起实施的海水水质标准 GB3097-1997, 除个别层次外, 16 号及其以东站点达到了国家一类海水关于溶解无机氮浓度的规定; 15 号站达到了二类海水的溶解无机氮标准; 12 号及其以西的站点则超过了四类海水的溶解无机氮标准; 位于 B 断面上各站的溶解无机氮浓度基本上都高于二类海水的上限。调查时间内, 20 号连续站各层次的溶解无机氮浓度基本上在一二类海水的范围内变化; 13 号连续站各层次的溶解无机氮浓度多数情况下高于四类海水的标准, 最低时接近但高于二类海水的上限。

2.1.2 磷酸盐 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度沿 A 断面的分布特征与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 相似, 在 6 号站之前变化较小, 基本在 $1.3 \mu\text{mol/L}$ 左右波动; 随后开始明显增加, 于 8 号站出现最大值 $2.05 \mu\text{mol/L}$, 是浓度开始增加前平均值的 1.58 倍, 之后沿径流入海方向逐渐降低(图 6)。总体上, 7—11 号站之间的区域为 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度高值区。沿岸河流和排污口点源无机磷的输入、水体中泥沙颗粒物的解吸附及水体或沉积物中含磷有机物的分解均有可能是造成 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度沿长江径流入海方向的这种分布特征的原因。沈焕庭(2001)的研究表明, 对于整个长江河口, 无论洪季还是枯季, 生物的呼吸作用强于初级生产力, 即长江河口是有机质的净消费者; 洪季有机质的降解过程对溶解无机磷的释放起到了重要作用。

$\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度沿 B 断面的分布总体上呈北部站点 0 m 层和离底 2 m 层之间的差异大于南部站点

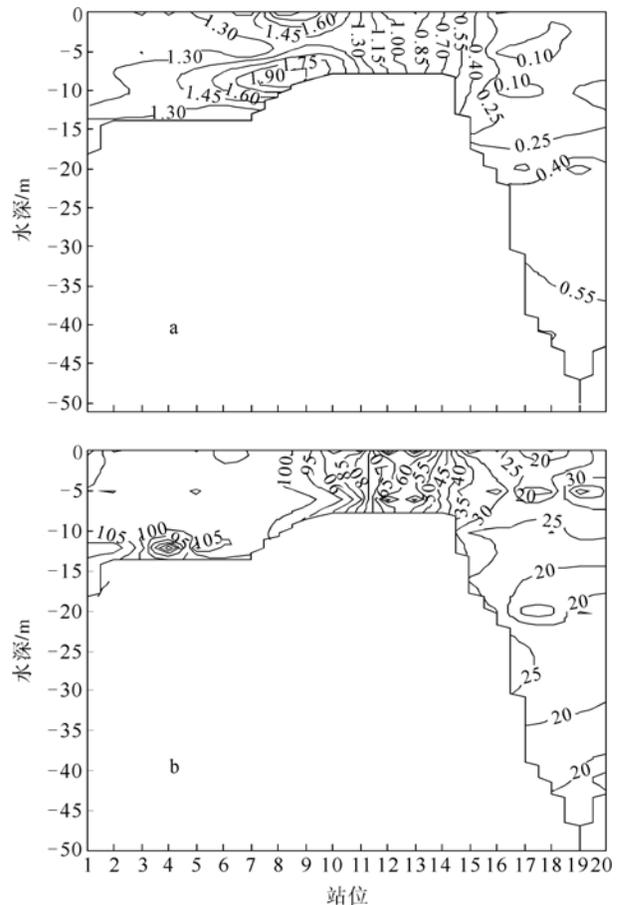


图 6 $\text{PO}_4\text{-P}$ (a)和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ (b)浓度等值线沿 A 断面的分布 ($\mu\text{mol/L}$)

Fig.6 The concentration isolines of $\text{PO}_4\text{-P}$ (a) and $\text{SiO}_3\text{-Si}$ (b) along Transect A (in $\mu\text{mol/L}$)

的格局(图 7)。除 24、25 号站之外, 其余站点都是 0 m 层的浓度高于离底 2 m 层。

13 号连续站 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度随时间的变化显示, 前一个 24 h 里同一时间所采的水样 0 m 层和离底 2 m 层之间的差异大多要小于后一个 24 h(图 8)。调查时间里, 同一时刻所采的水样 0 m 层 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度大多高于离底 2 m 层, 但两层的平均值相差不大(图 8, 表 2)。20 号连续站的数据显示, 同一时刻获得的水样 0 m 层和 5 m 层 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度大多非常接近, 而且它们随时间的变化趋势较为一致, 尤其在后一个 24 h 里(图 9)。各层的平均值显示, 总体上 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度随着水深的增加而增加, 离底 2 m 层为 0 m 层的 3.59 倍(表 2)。调查时间里, 离底 2 m 层 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的浓度波动比其他层弱; 变化最为剧烈的为 5 m 层。

2.1.3 硅酸盐 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度沿 A 断面的分布特征与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 均不同, 总体上沿入海方向持续降低; 在口门以西的水体

中其浓度波动不大, 从位于口门附近的 9 号站开始显著下降(图 6)。其在口门以内长江主航道的平

均值为 101.97 $\mu\text{mol/L}$; 在 15 号及其以东站位的水体中随深度变化不大, 一般不超过 30 $\mu\text{mol/L}$ 。

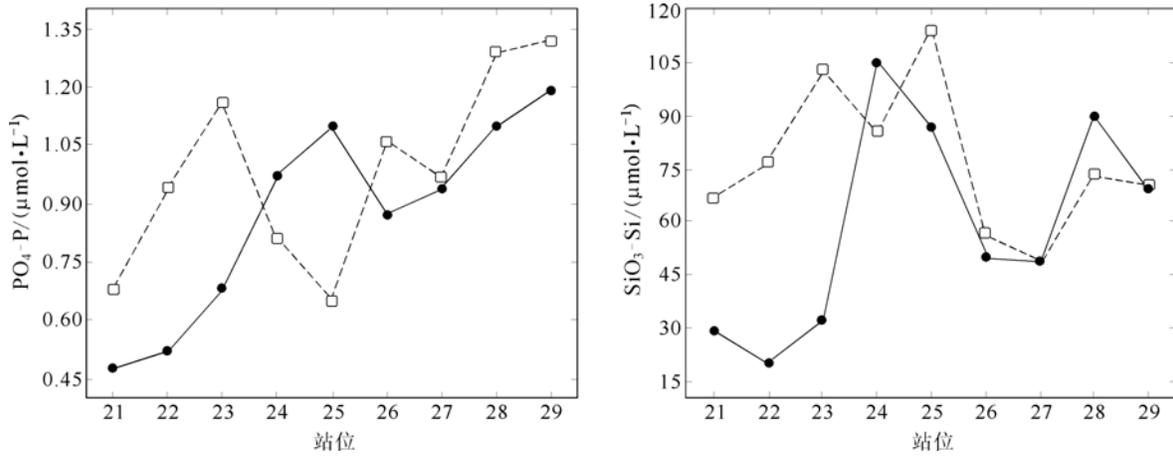


图 7 PO₄-P 和 SiO₃-Si 浓度沿 B 断面的分布

Fig.7 The spatial distributions of PO₄-P and SiO₃-Si concentrations along Transect B

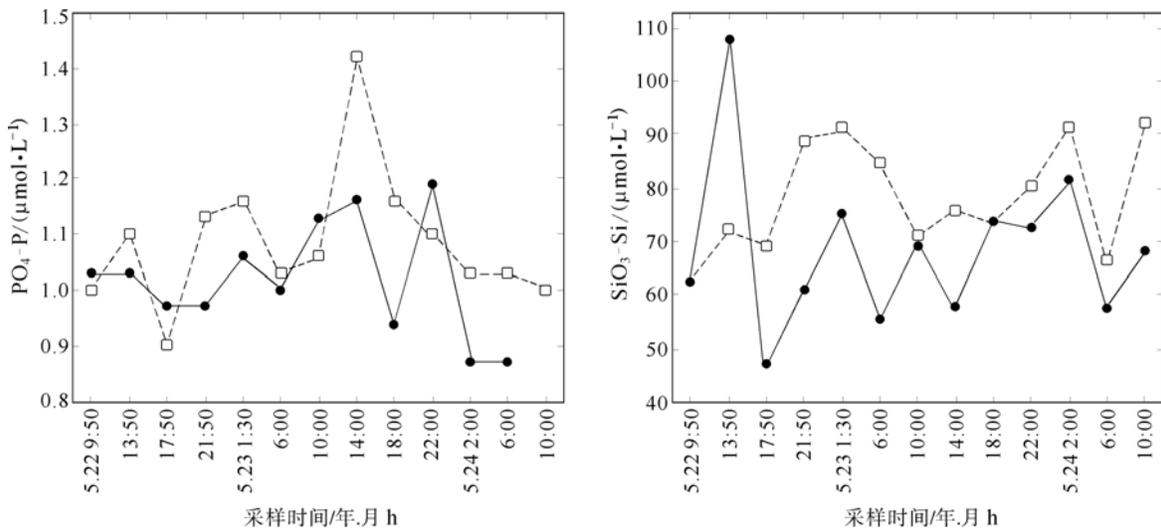


图 8 13 号站各层 PO₄-P 和 SiO₃-Si 浓度随时间的变化趋势

Fig.8 The variation trends of PO₄-P and SiO₃-Si concentrations vs. time for each layer at Station 13

表 2 13 和 20 号连续站各层 PO₄-P 和 SiO₃-Si 浓度的变化范围、平均值及标准偏差

Tab.2 The variation range, mean value and standard deviation of PO₄-P and SiO₃-Si concentrations for each layer at Stations 13 and 20

站号	层次	PO ₄ -P($\mu\text{mol/L}$)			SiO ₃ -Si($\mu\text{mol/L}$)		
		变化范围	平均值	标准偏差	变化范围	平均值	标准偏差
13	0 m	0.90—1.42	1.09	0.12	62.86—92.14	78.35	10.22
	离底 2 m	0.87—1.19	1.02	0.10	47.14—107.50	68.41	15.05
20	0 m	0.06—0.32	0.17	0.08	17.39—53.57	27.28	8.96
	5 m	0.06—0.32	0.16	0.08	18.68—122.86	33.42	27.42
	10 m	0.13—0.58	0.33	0.13	12.50—41.07	25.84	7.66
	20 m	0.06—0.61	0.37	0.17	11.96—51.43	22.71	11.84
	离底 2 m	0.48—0.81	0.61	0.10	9.46—75.00	28.21	18.94

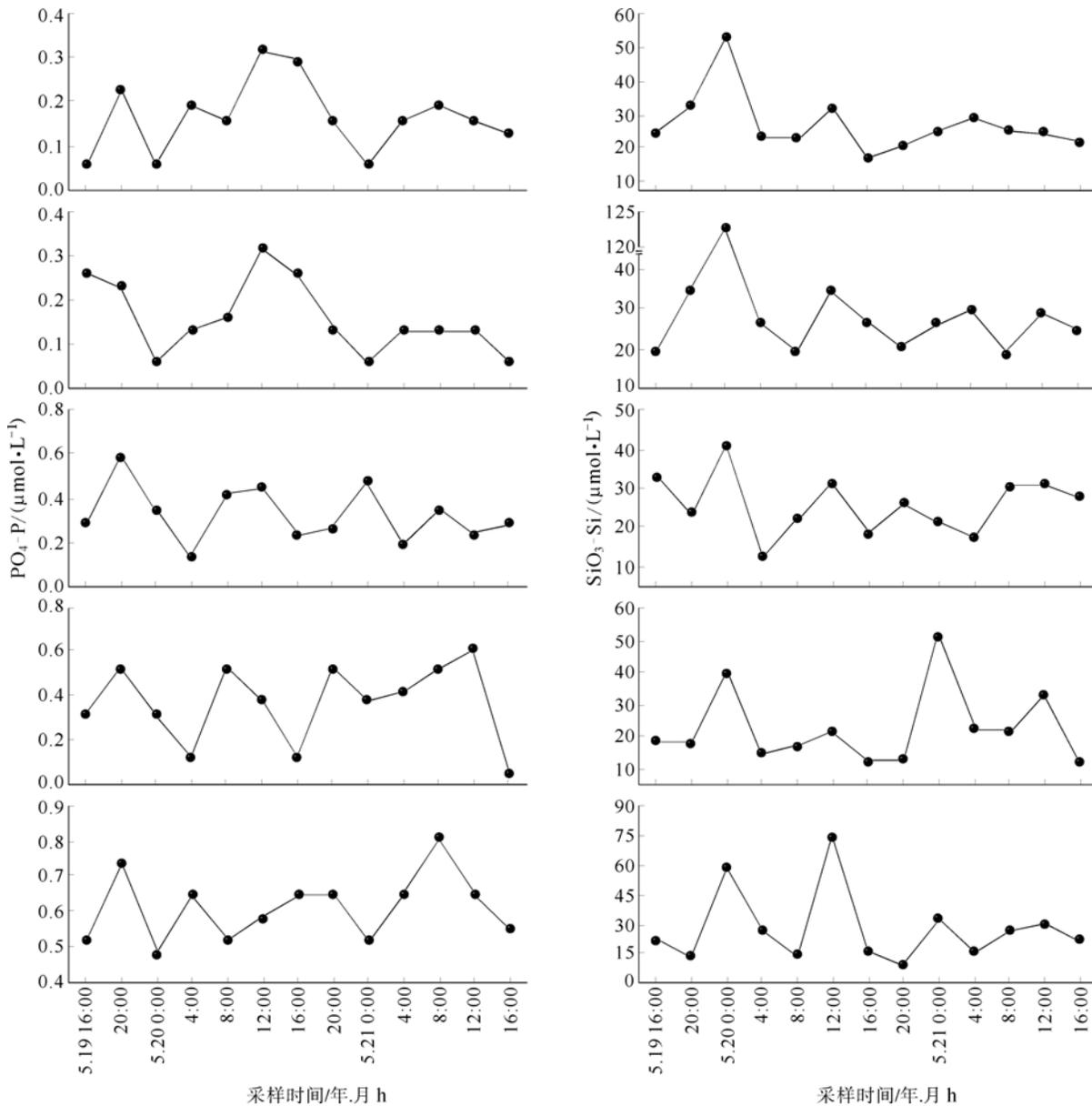


图9 20号站各层 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度随时间的变化趋势(图中由上至下依次为: 0 m、5 m、10 m、20 m 和离底 2 m 层)
 Fig.9 The variation trends of $\text{PO}_4\text{-P}$ and $\text{SiO}_3\text{-Si}$ concentrations vs. time for each layer at Station 20 (from top to bottom: 0 m, 5 m, 10 m, and 20 m from the surface, and 2 m above the bottom)

$\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度沿 B 断面的分布特征表明, 南部站位 0 m 层和离底 2 m 层之间的差异要小于北部站位, 这点与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度沿 B 断面的分布相似, 结合盐度、温度沿 B 断面的分布特征, 可以得出 B 断面南部站位(尤其是 26—29 号站)水体混合的均匀程度要高于北部站位的结论(图 7)。这些参数的分布特征反映了调查期间长江径流入海后的走向。最北面的 21—23 号站 0 m 层的盐度显著低于离底 2 m 层, 而 0 m 层的 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度却显著高于离底 2 m 层, 平均为离底 2 m 层的 3 倍多, 说明 0 m 层水中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 主要来

自于长江的输送; 这 3 个站 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的浓度数据也能反映出类似的现象。

13 号连续站 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 随时间的变化显示, 多数时间里其在 0 m 层的浓度要高于在离底 2 m 层的浓度(图 8)。从一个采样时间到另一个采样时间, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度在两个层中的变化幅度差异很大, 但多数时间里变化趋势一致: 一个层增加或降低, 另一个层也增加或降低。4 h 的时间间隔里, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 在两层中的浓度均可能出现 $>20 \mu\text{mol/L}$ 的变化幅度。尤其是离底 2 m 层, 变化幅度最大的一次超过 $60 \mu\text{mol/L}$, 在 5 月 22 日 13:50 至

17:50 的 4 h 里 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的浓度由 $107.50 \mu\text{mol/L}$ 下降至 $47.14 \mu\text{mol/L}$, 不到原来的一半。调查时间里, 0 m 层 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的浓度平均值高于离底 2 m 层(表 2)。20 号连续站 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 随时间的变化显示, 其在 0 m 层和 5 m 层中多数时间里具有相同的变化趋势, 尤其在第一个 24 h 里, 变化趋势完全一致(图 9)。各层的平均值显示, 5 m 层 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的浓度最高, 20 m 层最低(表 2)。4 h 的时间间隔里, 各层均可能发生较大的变化幅度。调查时间里, 5 m 层 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度的波动最剧烈, 10 m 层最轻。

2.2 影响因素分析

海水中不同形态营养盐的量值及其时空变化特征是各种物理、化学、生物等因素综合作用的结果。为了探讨长江口海区溶解态无机氮、磷、硅的空间分布及日变化主要影响因素, 对这些参数与一些主要水文、化学及生物参数之间的关系进行分析。

由海水的温度数据可知, 调查期间长江口呈夏季型温度分布特征, 即淡水的温度高于海水的温度。通过分析可以看出, 除 $\text{NH}_4\text{-N}$ 之外, 各营养盐均和温度呈显著的正相关关系, 和盐度呈显著的负相关关系, 这说明咸淡水的混合作用对这几类营养盐的空间分布有显著影响(表 3)。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 和 $\text{Chl.}a$ 之间的负相关关

系说明, 浮游植物对这三种营养盐的空间分布也有重要影响, 但从相关系数来看, 浮游植物的影响要弱于咸淡水混合作用的影响。TOC 和各营养盐之间的正相关关系说明有机物的分解对各营养盐的空间分布贡献不大。

13 号连续站的结果表明, $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 和盐度之间呈显著的负相关关系, 这说明水团运动对这三种营养盐的日变化有一定影响(表 4)。 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 和 $\text{Chl.}a$ 之间显著的负相关关系说明浮游植物对其日变化也有重要影响。 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和所研究的各环境因子之间均没有显著相关关系, 说明其日变化受水团运动和浮游植物的影响均不大。

20 号连续站的结果表明, $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和盐度之间呈显著的负相关关系, 这一方面说明长江径流的输送是该站 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的主要来源, 另一方面说明水团运动是引起该区域 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 日变化的重要因素(表 4)。与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 不同, $\text{PO}_4\text{-P}$ 和盐度呈显著的正相关关系, 并且和 $\text{Chl.}a$ 呈显著的负相关关系, 这说明 $\text{PO}_4\text{-P}$ 从水体或沉积物中再生可能是该站 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的重要补充, 同时浮游植物也在一定程度上控制着该站 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的日变化, 但从相关系数来看, 浮

表 3 溶解态无机氮、磷、硅与环境因子空间分布数据之间的相关系数

Tab.3 The correlation coefficient of dissolved inorganic N, P and Si vs. environmental factors based on spatial data

项 目	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NO}_2\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$	$\text{PO}_4\text{-P}$	$\text{SiO}_3\text{-Si}$
<i>S</i>	-0.942***	-0.392***	ns	-0.830***	-0.899***
<i>T</i>	0.804***	0.288*	ns	0.699***	0.805***
<i>Chl.a</i>	-0.304**	ns	ns	-0.416***	-0.251*
TOC	0.423***	0.348**	0.505**	0.477***	0.348**

ns: $P > 0.05$; *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$

表 4 溶解态无机氮、磷、硅与环境因子时间序列数据之间的相关系数

Tab.4 The correlation coefficient of dissolved inorganic N, P and Si vs. environmental factors based on time series data

项目	13 号站				20 号站			
	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NO}_2\text{-N}$	$\text{PO}_4\text{-P}$	$\text{SiO}_3\text{-Si}$	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NO}_2\text{-N}$	$\text{PO}_4\text{-P}$	$\text{SiO}_3\text{-Si}$
<i>S</i>	-0.622***	-0.447*	ns	-0.479*	-0.367**	-0.731***	0.751***	ns
<i>T</i>	ns	0.397*	ns	ns	ns	ns	-0.501***	ns
<i>Chl.a</i>	ns	ns	ns	-0.572*	ns	ns	-0.415*	ns
TOC	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

ns: $P > 0.05$; *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$

游植物的影响相对较弱; $PO_4\text{-P}$ 和 水体中的 TOC 之间没有显著相关关系, 因此沉积物中 $PO_4\text{-P}$ 的释放对 20 号站 $PO_4\text{-P}$ 日变化的影响可能要大于有机物的分解(表 4)。 $SiO_3\text{-Si}$ 和所研究的各环境因子之间均没有显著相关关系, 说明其日变化受水团运动和生物活动的影响均不大(表 4)。

2.3 调查区的营养状况

长江口附近海域的水体由 3 个主要水团构成: 长江淡水水团、混合水体和海水水团(Chen *et al.*, 1999)。由本次调查同步获得的盐度数据可知, 1—9 号站为淡水水团(盐度 <0.5), 10—16 号站为混合水水团(包括 B 断面上的 21—29 号站; $0.5 <$ 盐度 <30), 17 号及其以东站点为海水水团(盐度 >30)。按照这种划分将位于同一水团站位的营养盐数据进行平均就可以得到此水团相应营养盐的平均浓度, 结果示于表 5。将其与其他研究结果比较可以发现, $NO_3\text{-N}$ 、 $NO_2\text{-N}$ 、 $NH_4\text{-N}$ 和 $PO_4\text{-P}$ 在长江径流中的浓度比 20 世纪 80 年代初均有较大幅度的增加, 而 $SiO_3\text{-Si}$ 的浓度可以认为没有改变。与 20 世纪末相比, $NO_3\text{-N}$ 和 $PO_4\text{-P}$ 的浓度也有明显的增加; $NO_2\text{-N}$ 和 $NH_4\text{-N}$ 的浓度可以认为变化不大。混合水区由于各种营养盐时空分布极不均匀, 站位设置、调查时间等的差异对结果影响很大, 因此可比性较差, 但总的来看除了 $NH_4\text{-N}$ 浓度显著低于其他文献报道外, 其他形态

营养盐的浓度都在文献报道的范围内。海水区 $NO_3\text{-N}$ 和 $SiO_3\text{-Si}$ 的浓度明显高于文献报道值; $NO_2\text{-N}$ 和 $NH_4\text{-N}$ 的浓度明显低于文献报道值; $PO_4\text{-P}$ 的浓度在文献报道值的范围之内, 与 1998 年相同月份的值非常接近。

营养状态质量法是评价水体富营养化水平的常用方法之一(林荣根, 1996; 胡敦欣等, 2001), 其表达式为:

$$NQI = COD / COD_s + DIN / DIN_s + DIP / DIP_s + Chl.a / Chl.a_s$$

式中 COD、DIN、DIP(溶解无机磷)和 Chl.a 为实测值, COD_s 、 DIN_s 、 DIP_s 和 $Chl.a_s$ 为引发赤潮的富营养化临界值, 其值分别为 3 mg/L、0.2 mg/L(14.29 $\mu\text{mol/L}$)、0.045 mg/L(1.45 $\mu\text{mol/L}$)和 10 $\mu\text{g/L}$ 。NQI 大于 3 为富营养水平, 在 2—3 之间为中度营养水平, 小于 2 为贫营养水平。按此标准, 并以 $PO_4\text{-P}$ 代替 DIP 浓度, 则本次调查各大面站中, 1—14 及 21—29 号站绝大部分采样层次为富营养水平; 15、16 号站各层基本上为中度营养水平; 17—19 号站各层基本为贫营养水平。监测时间内, 13 号连续站各层次大部分时间处于富营养水平; 20 号连续站各层次大部分时间处于贫营养水平, 个别层次偶尔处于中度营养水平。

郭卫东等(1998)根据浮游植物正常生长 N、P 浓度和物质的量之比, 提出了潜在性富营养化

表 5 长江口营养元素不同时期的调查结果
Tab.5 The nutrient element measured at different times in the Changjiang River Estuary

区域	时间 (年. 月)	$NO_3\text{-N}$ ($\mu\text{mol/L}$)	$NO_2\text{-N}$ ($\mu\text{mol/L}$)	$NH_4\text{-N}$ ($\mu\text{mol/L}$)	$PO_4\text{-P}$ ($\mu\text{mol/L}$)	$SiO_3\text{-Si}$ ($\mu\text{mol/L}$)	参考文献
淡水区	1980.6	~65	<0.3		~0.75	~105	Edmond <i>et al.</i> , 1985
	1981.11	~45		<1.0	~0.25	~115	Edmond <i>et al.</i> , 1985
	1998.2	62.42	0.64	21.39	0.70		傅瑞标等, 2002
	1998.9	88.21	0.94	3.25	0.43		傅瑞标等, 2002
	2003.5	107.70	0.86	6.35	1.37	103.75	本研究
混合水区	1981.8	43.1	0.86	0.63	0.39	79.4	黄尚高等, 1986
	1983.10	63.9	0.36	1.6			沈志良等, 1987
	1998.9	73.8	0.36	1.7	0.54	106.2	沈焕庭, 2001
	2003.5	43.29	0.37	<0.36	0.91	66.25	本研究
海水区	1988.8	4.70	0.60	0.84	0.31		沈焕庭, 2001
	1997.10	4.97	0.67	0.72	0.44	11.6	石晓勇等, 2003
	1998.5	4.58	0.70	2.26	0.34	9.61	石晓勇等, 2003
	2003.5	12.33	0.33	<0.36	0.33	26.30	本研究

表 6 营养级的划分标准
Tab. 6 The criterion of classifying trophic status

级 别	营养级	DIN ($\mu\text{mol/L}$)	PO ₄ -P ($\mu\text{mol/L}$)	N/P
I	贫营养	<14.28	<0.97	8—30
II	中度营养	14.28—21.41	0.97—1.45	8—30
III	富营养	>21.41	>1.45	8—30
IV _P	磷限制中度营养	14.28—21.41	—	>30
V _P	磷中等限制潜在性富营养	>21.41	—	30—60
VI _P	磷限制潜在性富营养	>21.41	—	>60
IV _N	氮限制中度营养	—	0.97—1.45	<8
V _N	氮中等限制潜在性富营养	—	>1.45	4—8
VI _N	氮限制潜在性富营养	—	>1.45	<4

的观点, 并在此基础上提出了一种新的评价富营养化的标准(表 6)。按此标准, 本次调查各大面站中, 1—11 号站各采样层次的营养级为磷限制潜在性富营养; 14—16 及 21—29 号站绝大部分采样层次的营养级为磷中等限制潜在性富营养; 17—19 号站绝大部分采样层次的营养级为贫营养。调查时间内, 13 号连续站各层次大部分时间处于磷中等限制潜在性富营养; 20 号连续站各层次大部分时间处于贫营养水平, 个别层次有时处于磷限制中度营养水平。

3 结 语

(1) 洪季初期长江口海域营养盐的空间分布呈现出较好的规律性: SiO₃-Si 的浓度总体上沿长江径流入海方向递减, 其在淡水端的浓度 >100 $\mu\text{mol/L}$, 在离岸最远的海水端附近的浓度约为 10 $\mu\text{mol/L}$; NO₃-N、NO₂-N、NH₄-N 和 PO₄-P 沿长江径流入海方向的浓度分布则呈现出先增加后降低的特征, 最高值出现在咸淡水交界面附近, 分别为 130.0、3.14、31.43 和 2.06 $\mu\text{mol/L}$ 。南北方向上各种形态营养盐的浓度总体上呈现出北部海域表、底层之间差异大于南部海域的分布特征。混合水区中东部及海水区 NH₄-N 的浓度 <0.36 $\mu\text{mol/L}$ 。除 NH₄-N 外, 其他营养盐的空间分布在很大程度上受控于咸淡水的相互作用。

(2) 在混合水区和海水区获得的连续观测数据显示, NO₃-N、NO₂-N、PO₄-P 和 SiO₃-Si 的浓度均可能在 4h 的时间里发生较大幅度的波动。在混合水区, 由于水深较浅, 水体混合较容易, 垂直方向上各元素的浓度平均值差异不大; 在水深较

深的海水区, 随着水深的增加, NO₃-N 和 NO₂-N 的浓度平均值总体上呈下降趋势, PO₄-P 则相反, SiO₃-Si 变化不大。影响不同区域、不同营养盐日变化的因素各不相同。

(3) 按照 1998 年 7 月 1 日起实施海水水质标准 GB3097-1997, 除个别层次外, 海水区达到了国家一类海水关于溶解无机氮浓度的规定; 混合水区西部及淡水区则超过了四类海水的溶解无机氮标准。调查时间内, 位于海水区的 20 号连续站各层次的溶解无机氮浓度基本上在一二类海水的范围内变化; 位于混合水区的 13 号连续站各层次的溶解无机氮浓度多数情况下高于四类海水的标准, 最低时接近但高于二类海水的上限。

(4) 采用两种不同的方法对调查海域的营养状况进行了分析, 结果均显示调查海域在长江径流入海方向上由淡水区的高营养水平逐渐过渡到海水区的贫营养水平。

(5) 由于长江口水体中各营养元素浓度时空变化显著, 准确计算其入海通量难度很大, 需要足够多的高时空分辨率的数据。

参 考 文 献

- 石晓勇, 王修林, 韩秀荣等, 2003. 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. 应用生态学报, 14(7): 1086—1092
- 宋金明, 李学刚, 邵君波等, 2006. 南黄海沉积物中氮、磷的生物地球化学行为. 海洋与湖沼, 37(4): 370—376
- 李学刚, 宋金明, 李 宁等, 2005. 胶州湾沉积物中氮与磷的来源及其生物地球化学特征. 海洋与湖沼, 36(6): 562—571

- 沈志良, 刘 群, 张淑美等, 2001. 长江和长江口高含量无机氮的主要控制因素. 海洋与湖沼, 32: 465—473
- 沈志良, 刘兴俊, 陆家平, 1987. 长江下游无机氮和磷酸盐的分布及其在河口的转移过程. 海洋科学集刊, 28: 69—77
- 沈国英, 施并章, 2002. 海洋生态学(第二版). 北京: 科学出版社, 1—446
- 沈焕庭, 2001. 长江河口物质通量. 北京: 海洋出版社, 1—176
- 陆健健, 2003. 河口生态学. 北京: 海洋出版社, 1—318
- 林荣根, 1996. 海水富营养化水平评价方法浅析. 海洋环境科学, 15(2): 28—31
- 胡敦欣, 韩舞鹰, 章 申, 2001. 长江、珠江口及邻近海域陆海相互作用. 北京: 海洋出版社, 1—218
- 郭卫东, 章小明, 杨逸萍等, 1998. 中国近岸海域潜在性富营养化程度的评价. 台湾海峡, 17(1): 64—70
- 黄尚高, 杨嘉东, 暨卫东等, 1986. 长江口水体活性硅、氮、磷含量的时空变化及相互关系. 台湾海峡, 5(2): 114—122
- 傅瑞标, 沈焕庭, 2002. 长江河口淡水端溶解态无机氮磷的通量. 海洋学报, 24(4): 34—43
- Chen J Y, Li D J, Chen B L *et al*, 1999. The processes of dynamic sedimentation in the Changjiang Estuary. Journal of Sea Research, 41: 129—140
- Edmond J M, Spivack A, Grant B C *et al*, 1985. Chemical dynamics of the Changjiang estuary. Continental Shelf Research, 4: 17—36
- Flindt M R, Pardal M Â, Lillebø A I *et al*, 1999. Nutrient cycling and plant dynamics in estuaries: a brief review. Acta Oecologica, 20: 237—248
- Grasshoff K, Ehrhardt M, Kremling K, 1983. Methods of Seawater Analysis, second ed. Verlag Chemie GmbH D6940, Weinheim, 1—419
- Lorenzen C J, 1967. Determination of chlorophyll and phaeopigments: spectrophotometric equations. Limnology and Oceanography, 12: 343—346

THE CONCENTRATIONS OF DISSOLVED INORGANIC NITROGEN, PHOSPHORUS AND SILICON IN THE CHANGJIANG (YANGTZE) RIVER ESTUARY IN 2003

GAO Xue-Lu^{1,2}, SONG Jin-Ming¹

(1. Key Laboratory of Marine Ecology & Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071; 2. Key Laboratory of Tropical Marine Environmental Dynamics, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510301)

Abstract An observation was conducted in the Changjiang (Yangtze) River Estuary from May 19 to 26, 2003. In spatial and diurnal variations, dissolved inorganic nitrogen, phosphorus and silicon were examined. Data show that the trends of spatial distribution for these nutrients were clear. Generally, in downriver direction, the concentration of $\text{SiO}_3\text{-Si}$ decreased, while those of $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{PO}_4\text{-P}$ increased first, reaching the maximum at 130.0, 3.14, 31.43 and 2.06 $\mu\text{mol/L}$ respectively in the area where the freshwater and saline water met, and then decreased. Both $\text{NO}_3\text{-N}$ and $\text{SiO}_3\text{-Si}$ concentrations were above 100 $\mu\text{mol/L}$ in freshwater sector and decreased quickly as salinity increased; the minimum, about 2 and 10 $\mu\text{mol/L}$ respectively, were at the eastern part of the study area. In south-north direction, distribution of nutrient showed in overall the same trend that differences between the surface and bottom layers were more apparent in the northern part than in the southern part. The data obtained from anchor stations indicated that for $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ and $\text{SiO}_3\text{-Si}$, concentration could vary greatly within 4 hours. In the mixed water sector, shallow depth made the water mixing easily; therefore, the mean nutrient concentrations of them showed no significant differences among the studied layers. In the seawater sector, the average concentration of $\text{NO}_3\text{-N}$ and $\text{NO}_2\text{-N}$ decreased downward, while it was opposite for $\text{PO}_4\text{-P}$; the average concentrations between different layers were close for $\text{SiO}_3\text{-Si}$. According to the National Standard No. GB3097-1997 issued by the Standardization Administration of China (SAC), the dissolved inorganic nitrogen concentrations qualified Chinese seawater Grade I in the seawater sector with few exceptions, while it exceeded the limit of Grade IV in the freshwater sector and the western part of the mixed water sector. In this paper, two different methods were used to analyze the trophic status; and both showed that in downriver direction, the status was gradually shifted from being eutrophic to oligotrophic. Because of the dynamic pattern in this estuary, spatial and diurnal variations in dissolved inorganic N, P and Si were very variable. Accurate estimate on their fluxes to the East China Sea demands more spatial and temporal investigation data, as well as those from hydrological, chemical and biological aspects.

Key words Nutrients, Spatial distribution and diurnal variation, Trophic status, Changjiang (Yangtze) River Estuary