

# 长江口区营养盐的分布特征及三峡工程对其影响\*

沈志良 陆家平 刘兴俊 刁焕祥  
(中国科学院海洋研究所)

在长江口海区,长江冲淡水、台湾暖流、黄海冷水等多种水系混合、交汇,错综复杂。对河口营养盐分布变化规律的研究,将为河口环境和生态变化提供可靠的依据,营养盐作为长江口这一世界著名渔场的化学物质基础具有重要意义。本文通过对长江口及其附近海域的周年观察,讨论了各种营养盐(包括磷、硅和氮)的时空变化规律和它们在河口的转移过程,估算了营养盐的年输出量,并提出了长江流量和营养盐输出量之间的关系,初步预报了三峡工程对长江口营养盐可能产生的影响。

## 一、调查和方法

调查于 1985 年 8 月—1986 年 7 月进行,共 11 个航次(2 月份未调查),调查范围,长

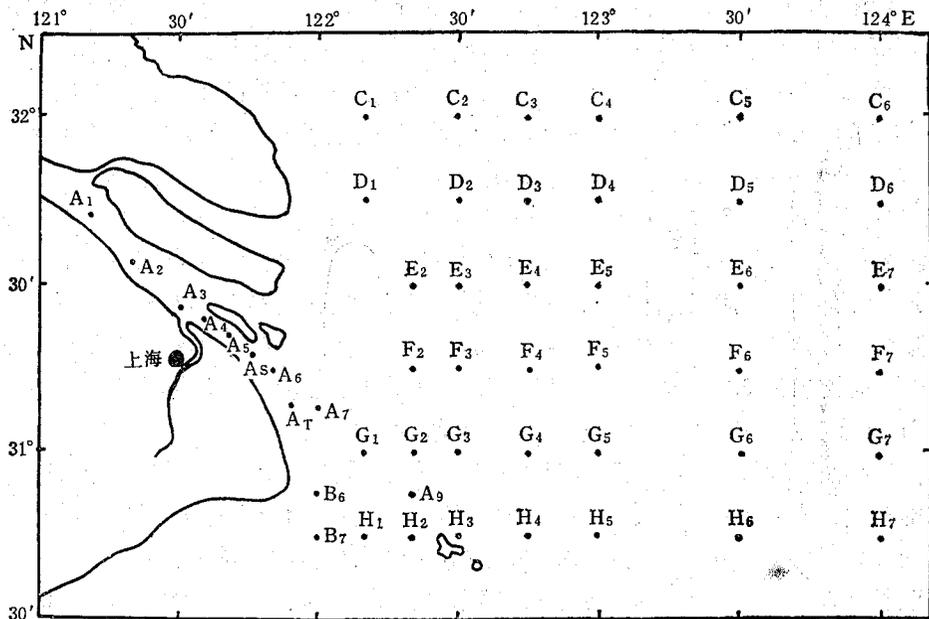


图 1 调查站位图

\* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 2058 号。  
收稿日期: 1989 年 11 月 4 日。

江口内为  $121^{\circ}14' - 121^{\circ}54' E$ , 共设 8 个站; 长江口海区为  $122^{\circ} - 124^{\circ} E$ ,  $30^{\circ}45' - 32^{\circ}00' N$ , 其中 8, 10 和 5 月在全区范围调查, 1 月只到  $123^{\circ}00' E$ , 其他月份到  $123^{\circ}30' E$ 。8, 10, 11, 1 和 5 月为重点调查月, 分层取样, 其他月份仅进行表层观测。整个调查区共设 50 个大面观测站, 分 7 条断面, 详见图 1。

全部水样用国产不锈钢颠倒采水器取得, 装在聚乙烯瓶中, 水样不经处理, 立即储存于  $-25^{\circ}C$  低温冰箱, 待回实验室后取上层清液测定。磷酸盐和硅酸盐分别采用磷钼蓝和硅钼蓝法测定; 铵-氮以次溴酸钠氧化法(刁焕祥, 1983)、亚硝酸盐以重氮偶氮法、硝酸盐以二苯基联苯胺二磺酸钠 (BSPB) 法(刁焕祥, 1985) 测定。全部水样利用美国 Technicon AA-II 自动分析仪进行比色分析。

## 二、结果和讨论

1. 平面分布 有季节代表性的 8, 11, 1 和 5 月的营养盐表、底层平面分布见图 2—6。

(1)  $PO_4-P$  的分布 从图 2 可看出, 长江口海区表层  $PO_4-P$  的分布一般是河口附近高, 外海较低, 这主要是河水影响的结果, 这种分布趋势以 8 月份最为明显。夏季, 由于长江冲淡水主流从河口东南转向东北, 出现一个低盐水舌(张法高等, 本集), 盐度 ( $S$ ) 为 25 的低盐水前锋到达  $32^{\circ}N$  以北, 东面接近  $124^{\circ}E$ 。8 月, 表层  $PO_4-P$  浓度等值线的分布反映了冲淡水的影响, 其量值从河口东南向东北逐步递减, 东南角浓度较低与外海水入侵有关(图 2), 在  $S < 25$  的低盐水域, 浓度大于  $0.6 \mu mol/L$ , 整个调查区  $PO_4-P$  的浓度均较高。11 月, 表层浓度大于  $0.6 \mu mol/L$  的范围缩小(图 2)。1 月, 长江流量达到全年的最低点,  $PO_4-P$  浓度也下降, 盐度为 25 等值线退缩到  $122^{\circ}20' E$  以西水域,  $PO_4-P$  浓度的  $0.6 \mu mol/L$  等值线也随之退缩到河口附近(图 2)。5 月, 在调查区东南部有一个高含量区(图 2), 最高值达  $4.3 \mu mol/L$ , 这是由于该区发生赤潮, 生物大量死亡, 分解再生  $PO_4-P$  所致。8, 10 和 11 月  $PO_4-P$  的底层分布趋势与表层相似; 1 月分布较均匀, 大部分站介于  $0.5 - 0.6 \mu mol/L$  之间; 5 月河口外南部和调查区中部较高, 浓度向东北方向逐渐下降。从底层盐度分布可见, 长江水影响区主要在  $122^{\circ}30' E$  以西水域  $PO_4-P$  除受长江水影响外, 生物分解再生也是其重要来源, 以 8 月生物繁殖高峰期较为明显, 底层平均含量为  $0.80 \mu mol/L$  ( $123^{\circ}30' E$  以西海域, 下同), 高于表层 ( $0.68 \mu mol/L$ )。秋冬季节, 由于水体垂直交换, 表底层  $PO_4-P$  浓度差别很小。

(2)  $SiO_3-Si$  的分布 从图 3 可以看出, 长江口区  $SiO_3-Si$  的表层分布规律是河口及其附近高, 河口内最高, 向外海逐渐降低, 恰好与盐度从低到高的分布趋势相反, 其浓度梯度比  $PO_4-P$  大得多。表层  $SiO_3-Si$  的分布曲线与盐度非常相似。8 月,  $SiO_3-Si$  等值线以长江口为中心, 呈舌状向东北方向延伸(图 3),  $10 \mu mol/L$  和  $5 \mu mol/L$  等值线与盐度的 25 和 30 等值线的位置基本相似, 东部和东南部水域为低含量区, 主要由于外海水团影响和上层浮游植物摄取所致。秋冬季,  $SiO_3-Si$  水舌南移, 10 月, 20 和  $10 \mu mol/L$  等值线大致与盐度的 25 和 30 等值线吻合; 11 月,  $20 \mu mol/L$  线与盐度的 30 等值线较为一致; 1 月,  $20 \mu mol/L$  等值线退缩到河口附近(图 3); 5 月, 在盐度的 25 等值线以

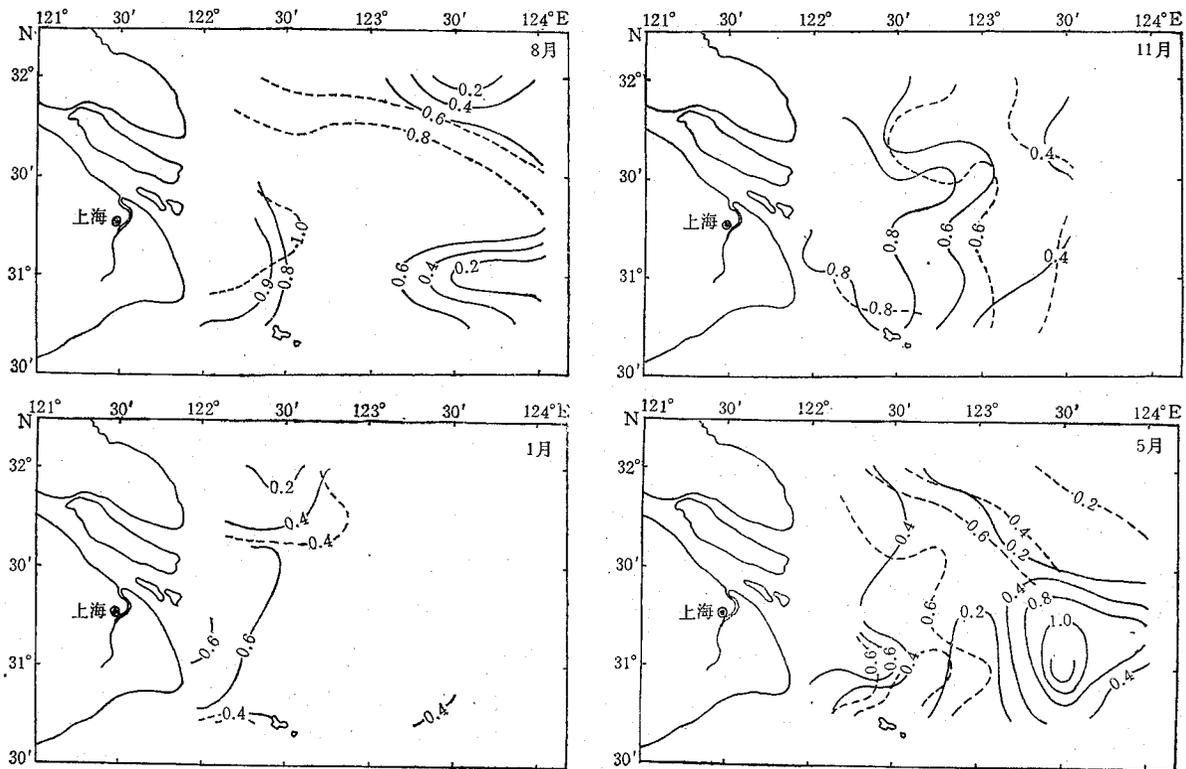


图2  $PO_4-P$  平面分布 ( $\mu mol/L$ )

—表层; ---底层 (图2—6同)

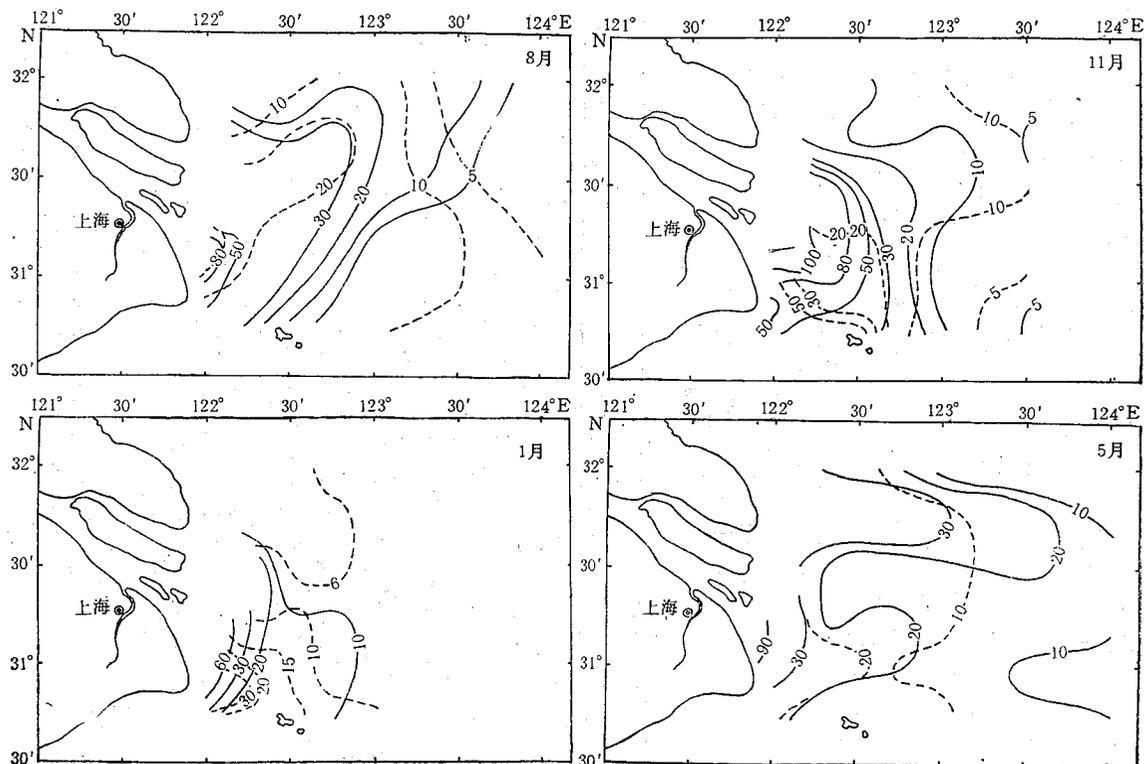


图3  $SiO_3-Si$  平面分布 ( $\mu mol/L$ )

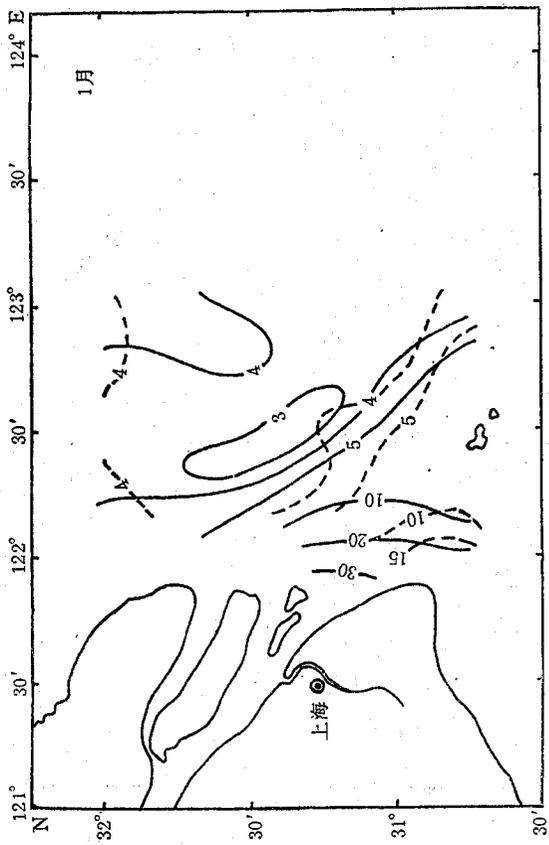
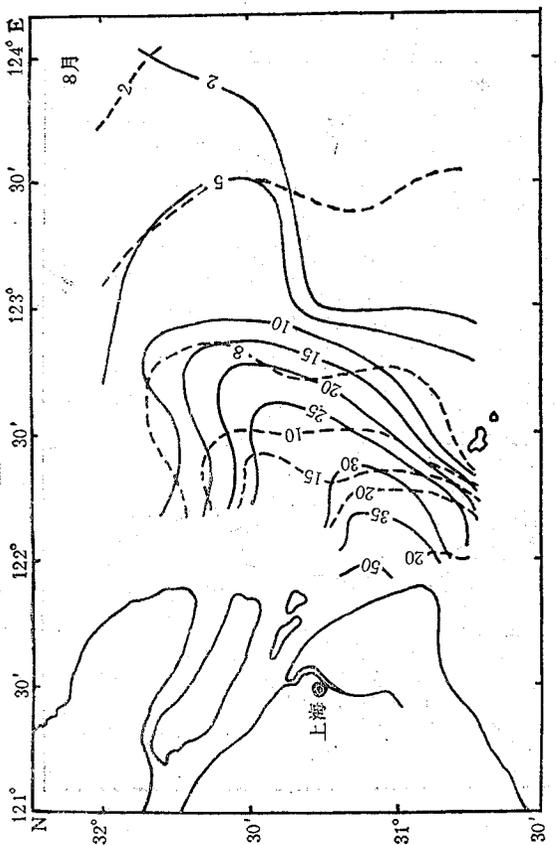
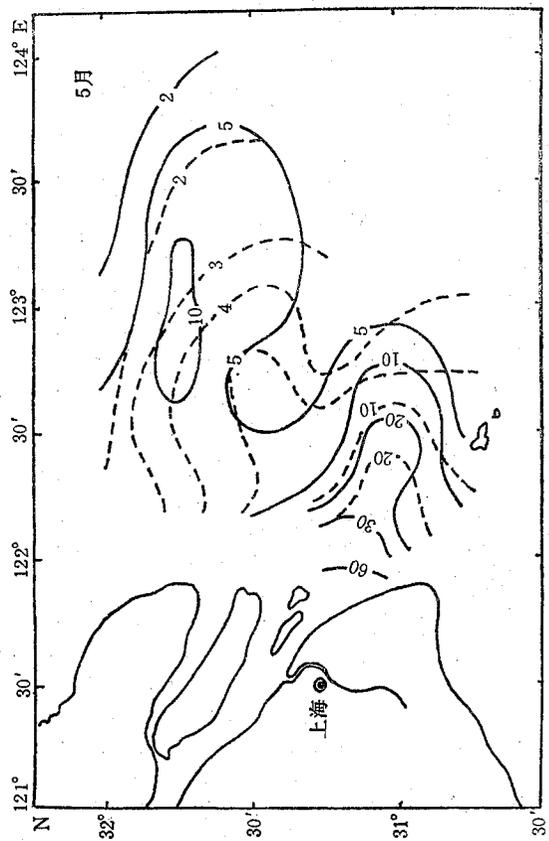
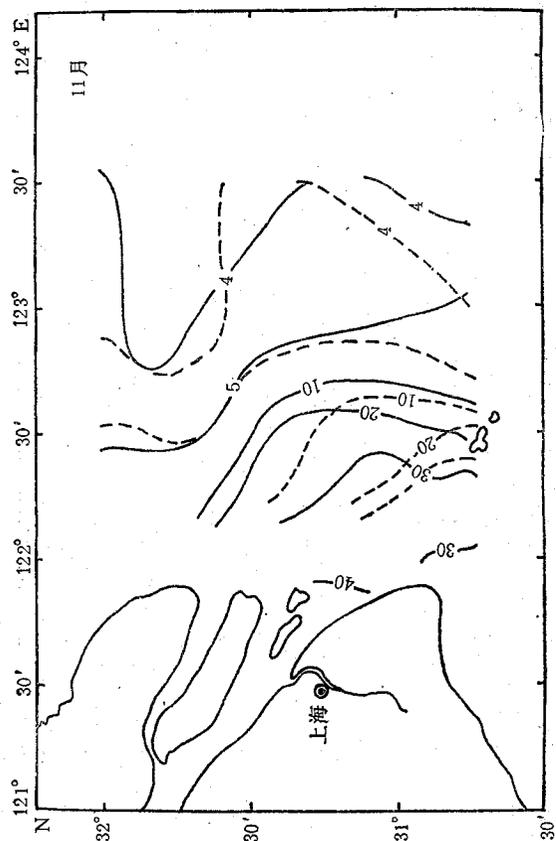


图 4 NO<sub>3</sub>-N 平面分布 (μmol/L)

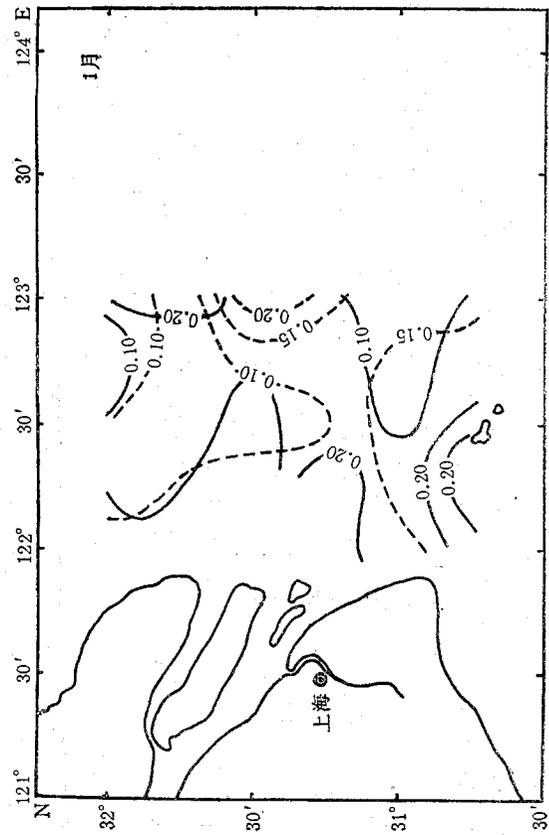
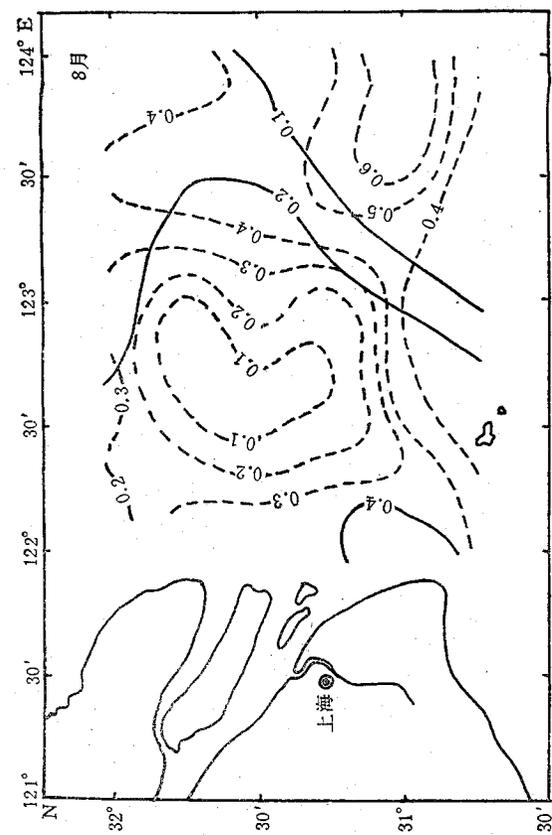
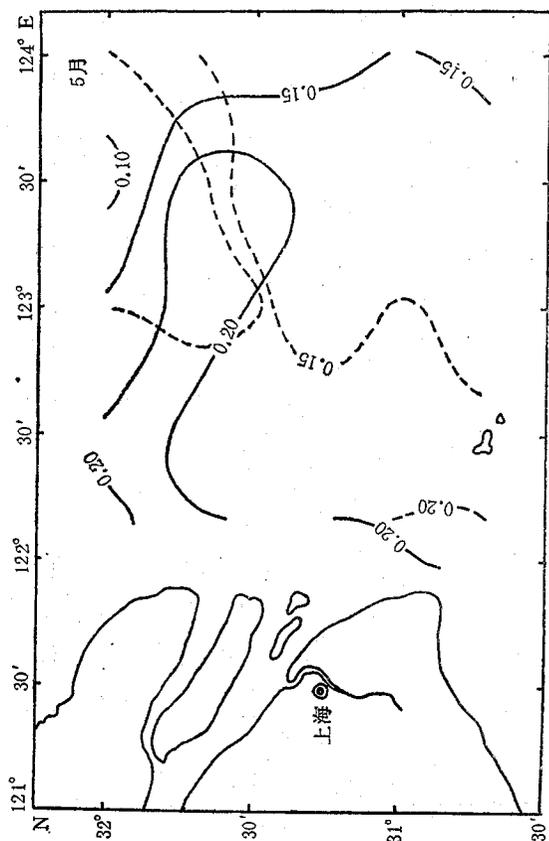
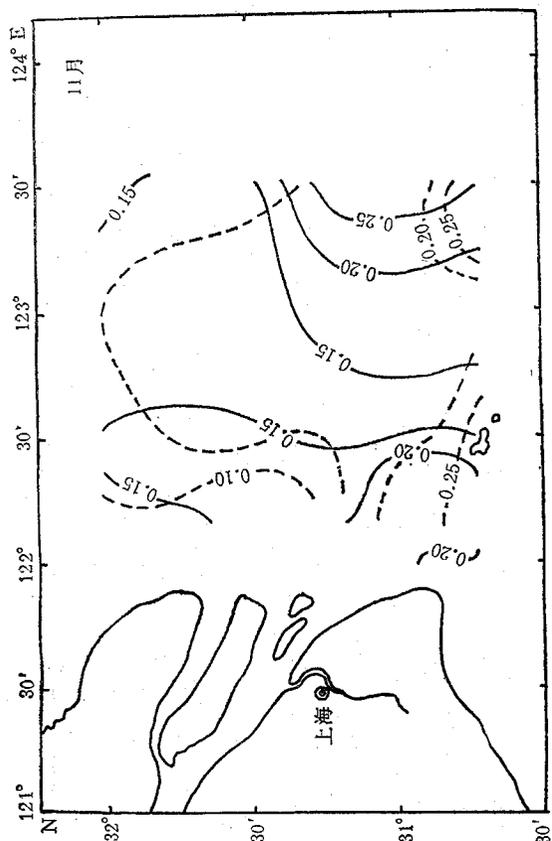


图 5 NO<sub>2</sub>-N 平面分布 (μmol/L)

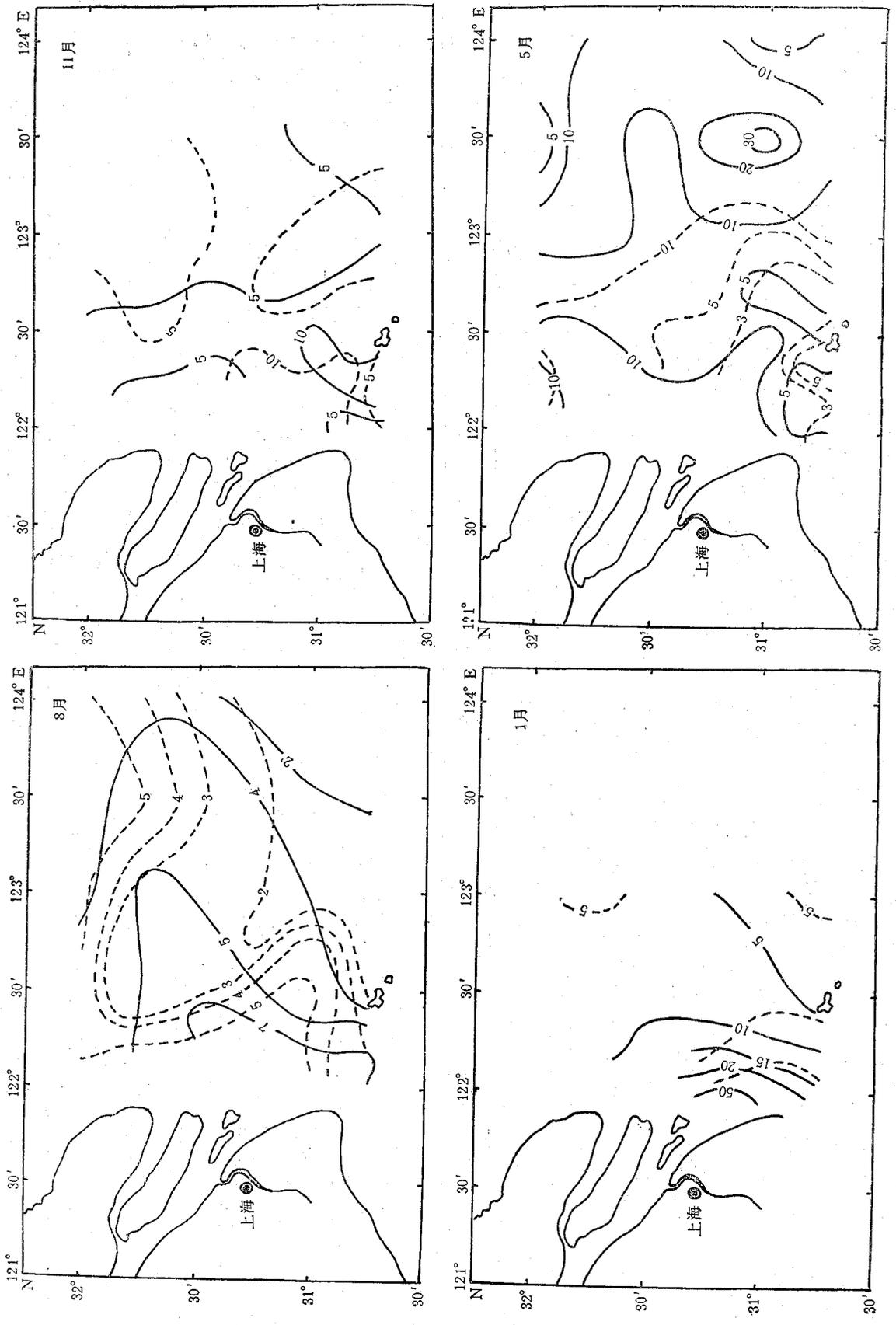


图6  $\text{NH}_4\text{-N}$  平面分布 ( $\mu\text{mol/L}$ )

内的大部分水域, 浓度大于  $20 \mu\text{mol/L}$ ; 底层外海水的涌升在  $122^{\circ}30' \text{ E}$  附近把  $20 \mu\text{mol/L}$  等值线分隔成南北两个水舌(图 3)。等值线的季节变化清楚地表明长江径流对  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  分布的影响之大。大陆径流的输入是决定海洋中  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  浓度的主要因素之一。从调查结果可以看出, 河口内  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  含量若高, 则海区  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  含量亦高; 河口内河水中  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  浓度比海水高得多, 如最高的 11 月为  $192 \mu\text{mol/L}$ , 是海区表层平均值的 6.2 倍。底层  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  的分布趋势与表层一致, 唯浓度梯度较表层小, 平均浓度也低, 特别是 1 月更为明显。 $\text{SiO}_3\text{-Si}$  被浮游植物吸收后主要构成细胞壁和骨骼, 分解过程比较缓慢, 在水浅的河口区其分解更不可能完全; 因此, 与受河水影响大的表层水相比较, 其底层的含量要低得多。如 8 月, 尽管浮游植物量较高 ( $7648 \times 10^4$  个细胞/ $\text{m}^3$ ), 底层浓度仍低于表层, 表、底层平均值分别为  $19.7 \mu\text{mol/L}$  和  $15.4 \mu\text{mol/L}$ ; 只有在外海水控制的东南部水域, 底层浓度高于表层, 显示出浮游生物的影响。1 月份, 由于水体垂直对流, 表、底层之间  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  浓度差明显缩小。

(3)  $\text{NO}_3\text{-N}$  的分布 从图 4 可以看出,  $\text{NO}_3\text{-N}$  的表层分布与  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  十分相似, 河口内最高, 向外逐渐降低。其分布图形与盐度极为一致, 浓度随盐度的增加而减少。8 月,  $\text{NO}_3\text{-N}$  等值线呈舌状偏向东北, 最低含量区在东南部水域, 浓度在  $1\text{--}2 \mu\text{mol/L}$  之间, 主要是受台湾暖流水侵入的影响(图 4)。10, 11 月, 由于长江径流量减少, 等值线南移, 高浓度区向长江口方向收缩, 最低含量区出现在东部偏北水域, 可能与秋季黄海沿岸流南下势力增强有关(图 4)。1 月, 长江冲淡水折向南, 大于  $20 \mu\text{mol/L}$  的高浓度区仅退缩到河口一小部分水域(图 4),  $5 \mu\text{mol/L}$  等值线大致与盐度的 30 等值线吻合。由于长江水输入大量营养盐, 在近河口的表层水中, 夏秋季  $\text{NO}_3\text{-N}$  含量明显比冬季高, 但在外海水势力较强的远岸水域, 却有所不同。以  $123^{\circ} \text{ E}$  6 个站为例, 8 月的平均浓度为  $3.3 \mu\text{mol/L}$ , 1 月为  $3.8 \mu\text{mol/L}$ , 冬季稍高于夏季, 这是由于 8 月浮游植物大量摄取  $\text{NO}_3\text{-N}$  的结果(该区浮游植物量, 8 月平均为  $10470 \times 10^4$  个细胞/ $\text{m}^3$ , 1 月仅为 8 月的  $1/598$ )。这说明长江口区  $\text{NO}_3\text{-N}$  的分布与生物活动也有很大关系, 只是河口附近由于长江水的巨大影响, 掩盖了浮游植物对营养盐的影响。5 月, 与  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  相似,  $5 \mu\text{mol/L}$  等值线被分割成南北两个水舌。从分布图可见, 底层  $\text{NO}_3\text{-N}$  分布趋势与表层相似, 但浓度小于表层, (就是在浮游植物影响大的 8 月也如此), 表、底层浓度分别为  $13.2 \mu\text{mol/L}$ ; 和  $9.8 \mu\text{mol/L}$ ; 与  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  一样, 只有在调查区东南部水域底层  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度才大于表层。入秋以后, 上、下层  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度日趋均匀, 1 月表、底层浓度分别为  $6.8 \mu\text{mol/L}$  和  $5.8 \mu\text{mol/L}$ 。

(4)  $\text{NO}_2\text{-N}$  的分布  $\text{NO}_2\text{-N}$  是三态无机 N 的中间产物, 它可以通过  $\text{NO}_3\text{-N}$  还原和  $\text{NH}_4\text{-N}$  氧化产生, 也能直接为浮游植物所同化; 它在热力学上不稳定, 所以含量比  $\text{NO}_3\text{-N}$  小得多。8 月,  $\text{NO}_2\text{-N}$  的表层分布与  $\text{NO}_3\text{-N}$  相似, 河口附近高, 最高的  $B_6$  站含量为  $0.5 \mu\text{mol/L}$ , 最低区在东南部水域(图 5)。10 月, 除河口含量较高外, 调查区北部也较高。11 月, 河口外偏南和东南角含量较高(图 5)。1 月是全年含量最低的月份, 表层含量平均  $0.14 \mu\text{mol/L}$  (图 5)。5 月,  $\text{NO}_2\text{-N}$  浓度有所增加, 大部分水域都介于  $0.15\text{--}0.20 \mu\text{mol/L}$  之间(图 5)。底层  $\text{NO}_2\text{-N}$  的分布较复杂。8 月最高含量区在东南部水域, 与表层的分布正相反, 这可能与下层浮游生物氧化分解有关; 11 和 1 月, 南部浓度高

于北部,表、底层浓度较为一致;5月,除东南部外,其余水域浓度均大于  $0.15 \mu\text{mol/L}$ 。

(5)  $\text{NH}_4\text{-N}$  的分布  $\text{NH}_4\text{-N}$  在海水中的含量除受长江水输入的很大影响外,与浮游植物的摄取和有机物的分解以及它的进一步氧化等有关,浮游动物和其他水生生物能直接排泄  $\text{NH}_4\text{-N}$ , 雨水也带来较大量的  $\text{NH}_4\text{-N}$ 。影响因素较多,因而  $\text{NH}_4\text{-N}$  的分布较为复杂。从图6可以看出,1月和8月,  $\text{NH}_4\text{-N}$  分布趋势是西面高,东面低;河口内和海区8月的含量较低,平均分别为  $8.3 \mu\text{mol/L}$  和  $5.0 \mu\text{mol/L}$ ; 1月的含量很高,河口

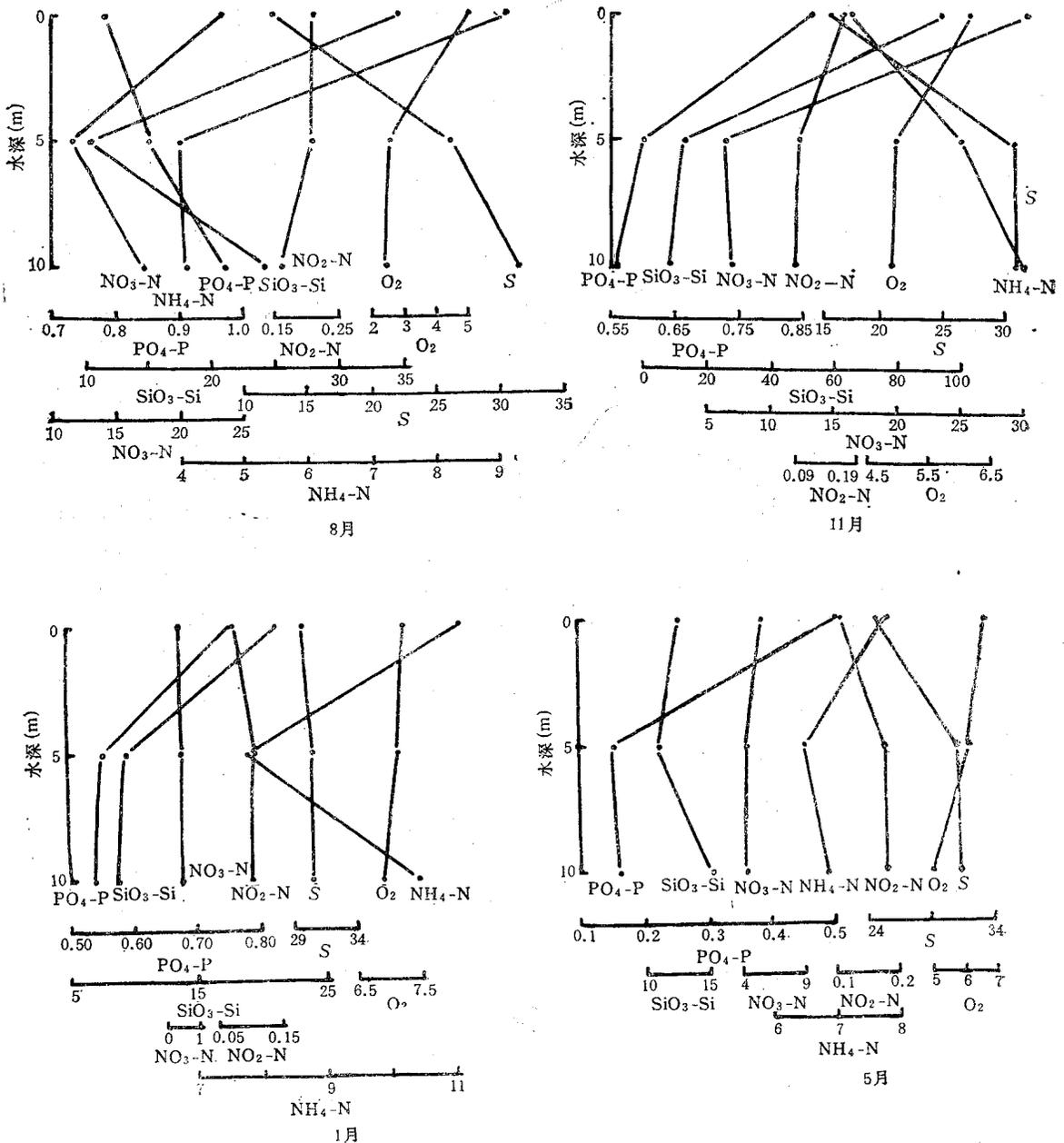


图 7a E<sub>2</sub> 站营养盐 ( $\mu\text{mol/L}$ )、溶解氧  $\text{O}_2$  (mL/L) 和盐度 S 的垂直分布

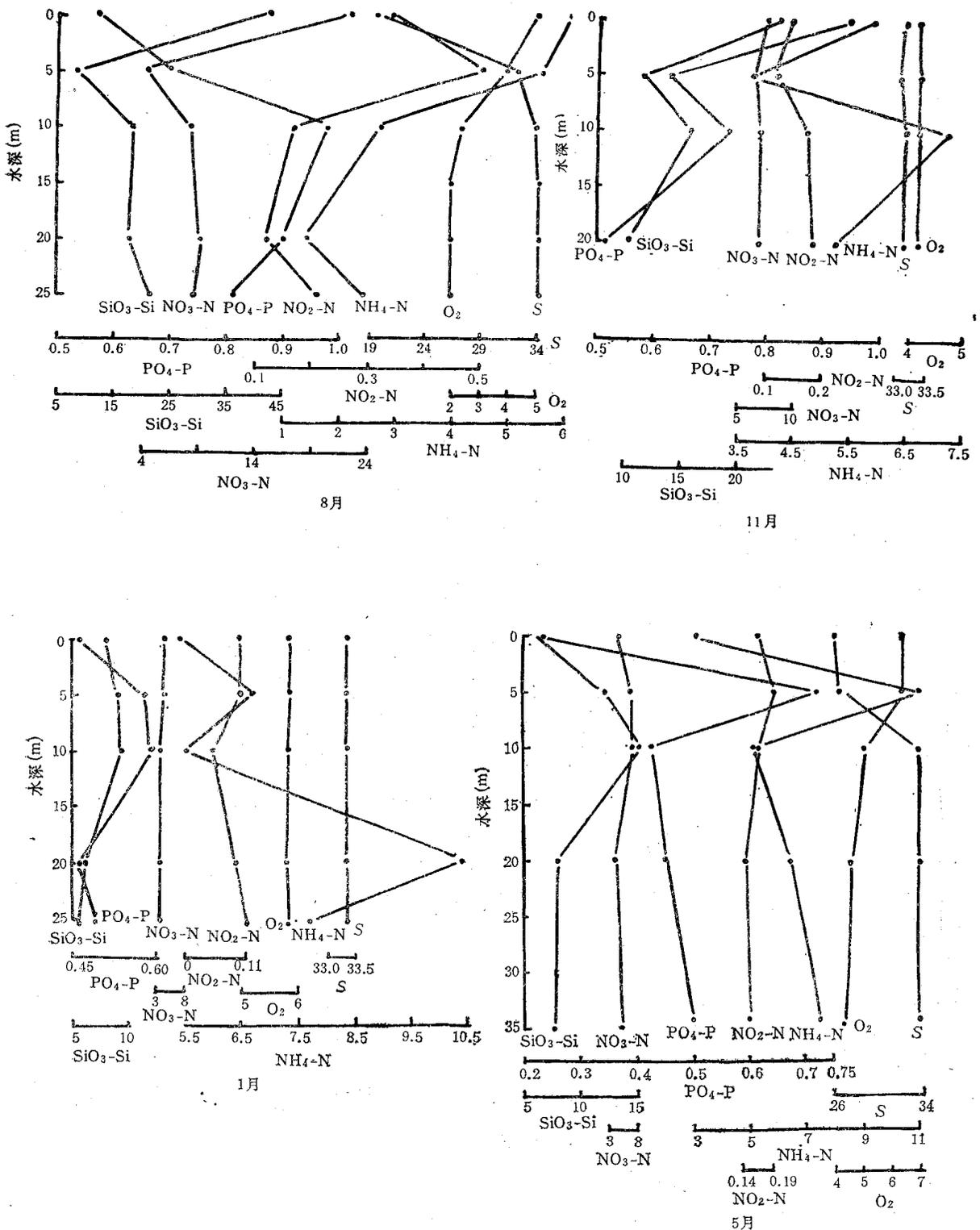


图 7b E<sub>4</sub> 站营养盐 ( $\mu\text{mol/L}$ )、溶解氧 O<sub>2</sub>(mL/L) 和盐度 S 的垂直分布

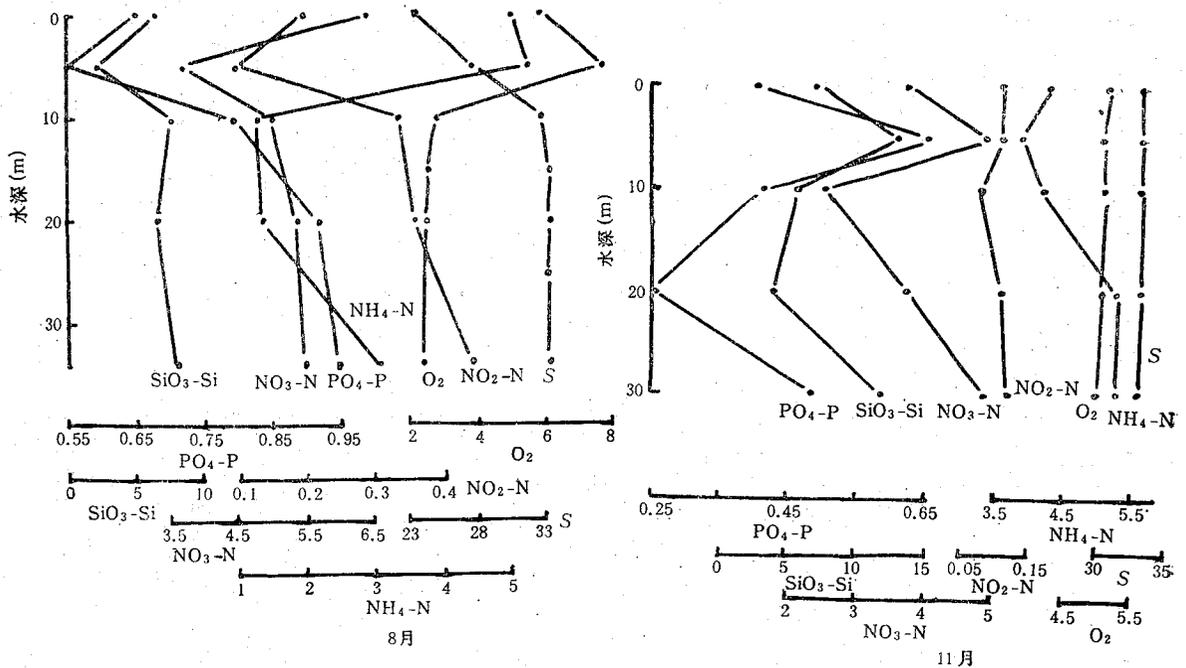


图 7c E<sub>6</sub> 站营养盐 ( $\mu\text{mol/L}$ )、溶解氧  $\text{O}_2$  ( $\text{mL/L}$ ) 和盐度  $S$  的垂直分布

内高达 107—126  $\mu\text{mol/L}$ 。从江口到外海,相当高的浓度差清楚地表明了长江水对调查海区  $\text{NH}_4\text{-N}$  分布的影响。10, 11 月,大部分水域表层含量在 3—6  $\mu\text{mol/L}$  之间。5 月,  $\text{NH}_4\text{-N}$  的分布较复杂,东南部水域有一个高含量区,浓度大于 20  $\mu\text{mol/L}$ ,最高达 35.8  $\mu\text{mol/L}$  (G<sub>6</sub> 站),这是由该区发生赤潮引起的。底层  $\text{NH}_4\text{-N}$  含量低于表层,分布比表层更复杂。8 月除河口含量较高外,北部偏东水域也较高;10, 11 月大部分水域含量与表层一样,1 月底层的分布趋势与表层相似;5 月,  $\text{NH}_4\text{-N}$  的分布特点是外海高,河口低,与底层  $\text{NO}_3\text{-N}$  分布趋势相反,东北部水域  $\text{NH}_4\text{-N}$  含量最高 ( $\text{NO}_2\text{-N}$  也较高),  $\text{NO}_3\text{-N}$  最低,表明那里的有机 N 分解正处于初级阶段。调查表明,长江口有丰富的  $\text{NH}_4\text{-N}$ 。 $\text{NH}_4\text{-N} \rightarrow \text{NO}_2\text{-N} \rightarrow \text{NO}_3\text{-N}$  是热力学的必然趋势,但是在水浅而生物作用强烈的长江口区,各种形态无机 N 之间的热力学平衡是难以达到的(顾宏堪等, 1981)。

调查区总无机 N 和  $\text{PO}_4\text{-P}$  之原子比  $\Sigma\text{N/P}$  随空间和时间的变化很大。如 10 月,河口 G<sub>1</sub> 站,表层  $\Sigma\text{N/P}$  为 124,而底层仅为 24;7 月 E<sub>2</sub>—E<sub>6</sub> 站,表层的  $\Sigma\text{N/P}$  从 99 降到 23;11 月 G<sub>1</sub>—G<sub>3</sub> 站,底层的  $\Sigma\text{N/P}$  从 74 降到 19;在生物繁殖高峰期的 8 月,表层  $\Sigma\text{N/P}$  介于 4.4—72 之间,变化也很大。综观全年调查,  $\Sigma\text{N/P}$  是高的,河口内各月表层平均为 70—456,海区表层月平均为 25—43,底层 5 个月月平均为 17—40,比海水中  $\Sigma\text{N/P}$  的正常比 16 高很多。 $\Sigma\text{N/P}$  高并不反映浮游植物对无机 N 和  $\text{PO}_4\text{-P}$  的吸收比例或有机物氧化分解的比例,这主要是由于长江水输送大量无机 N 入海的缘故。河口由于长江水的影响,  $\Sigma\text{N/P}$  一般较高,在外海则较低,4 个季度的代表性月份除 5 月外,123° E 以东海域表层  $\Sigma\text{N/P}$  平均分别为 16, 21 和 20,比较接近海水中的正常比值;5 月份高的  $\Sigma\text{N/P}$  与该区因发生赤潮而  $\text{NH}_4\text{-N}$  异常高相一致。

**2. 垂直分布和断面分布** 营养盐的垂直分布见图 7。由于物理、化学和生物等诸多因素的影响,长江口区营养盐的垂直分布呈现较为复杂的变化。8月, E<sub>5</sub> 站以西,上层水中 SiO<sub>3</sub>-Si 和无机N(主要是 NO<sub>3</sub>-N) 浓度随水深而减少,与盐度的上升趋势相反,主要反映了长江冲淡水的影响随水深而减弱; 5 m 以下浓度有所增加,这是有机物分

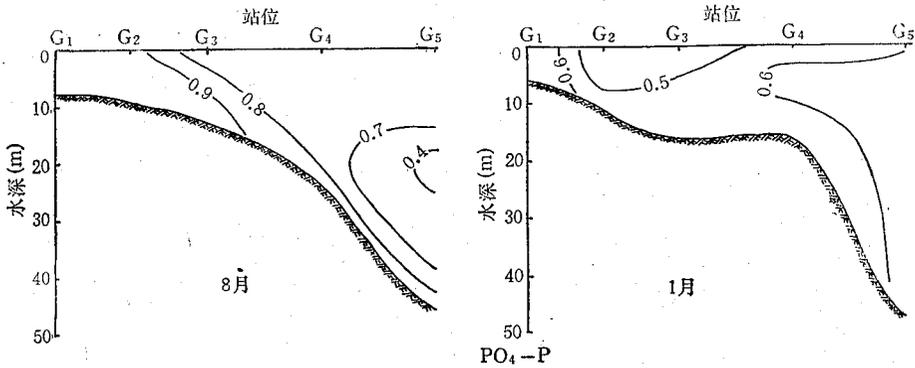


图 8a PO<sub>4</sub>-P (μmol/L) 断面分布

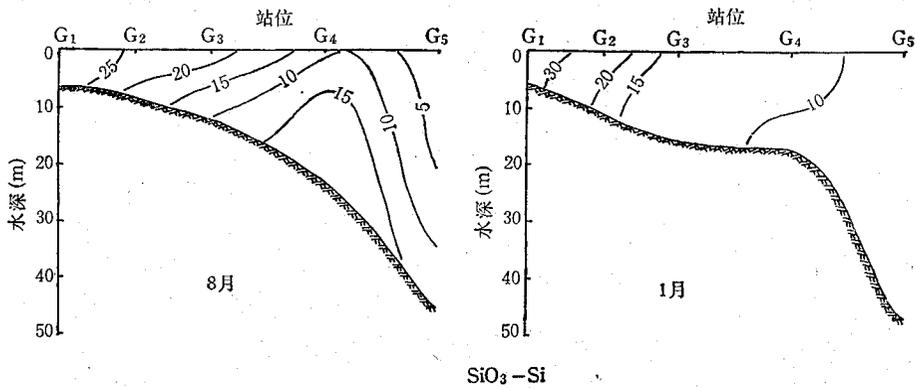


图 8b SiO<sub>3</sub>-Si (μmol/L) 断面分布

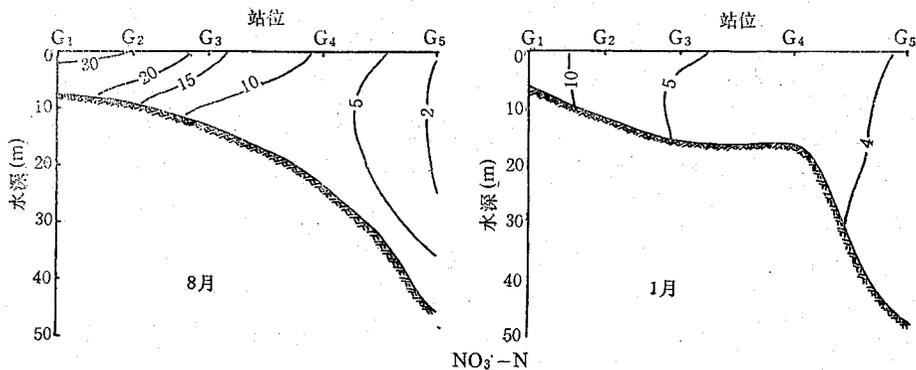
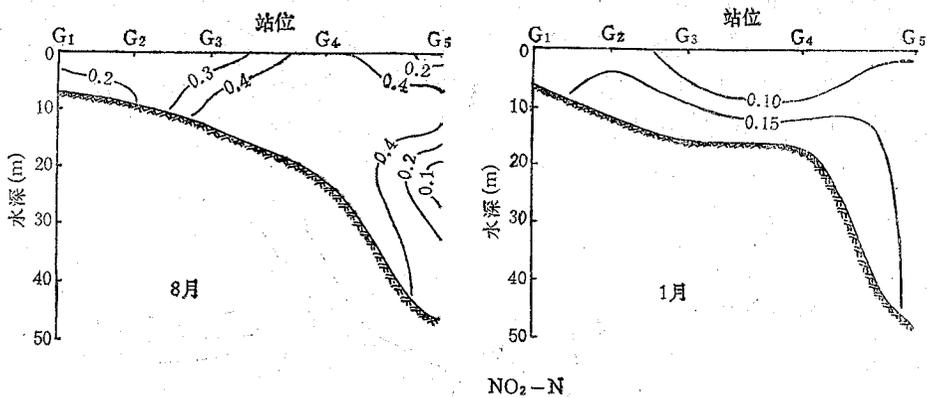
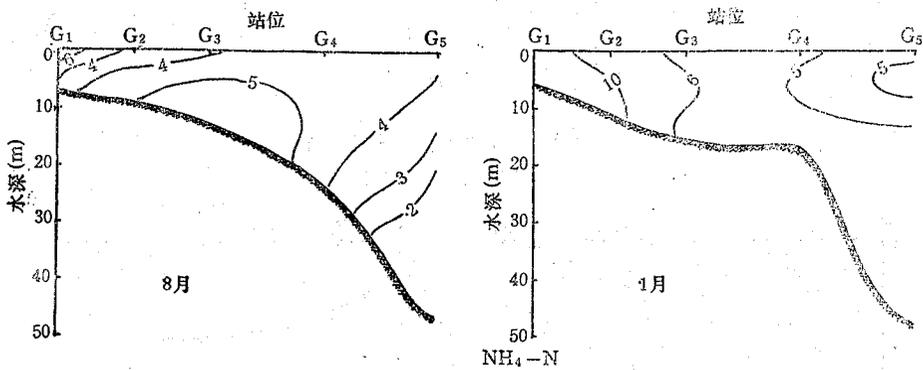


图 8c NO<sub>3</sub>-N (μmol/L) 断面分布

图 8d  $\text{NO}_2\text{-N}$  ( $\mu\text{mol/L}$ ) 断面分布图 8e  $\text{NH}_4\text{-N}$  ( $\mu\text{mol/L}$ ) 断面分布

解的结果。长江河口水和海水中  $\text{PO}_4\text{-P}$  浓度差较小,其垂直分布呈现上层低于下层的特点,可能与生物活动等因素有关。 $E_6$  和  $E_7$  站,外海水势力增强,生物影响比较显著,营养盐浓度与溶解氧明显呈相反关系。上层水中,由于浮游植物的同化作用,  $\text{PO}_4\text{-P}$ ,  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  和  $\text{NO}_3\text{-N}$  的浓度随水深而减小,而溶解氧略有增加; 5 m 以下,由于生物的分解作用,它们的浓度随溶解氧的下降(下降到 3 mL/L 以下)而迅速增加。由于有机 N 分解,在跃层下界  $\text{NO}_2\text{-N}$  迅速累积。某些站  $\text{NH}_4\text{-N}$  与  $\text{NO}_3\text{-N}$  和  $\text{NO}_2\text{-N}$  的趋势相反,  $\text{NH}_4\text{-N}$  降到最小值时,  $\text{NO}_3\text{-N}$  最大,以  $E_5$  和  $E_7$  站较为显著,表明硝化作用进行比较充分。11 月,长江水量锐减,冲淡水影响区西移,除  $E_6$  站外,上层(5 m 以上)营养盐浓度一般随水深均有下降趋势,这种变化,在江口  $E_3$  站以西主要反映了长江水的影响,在其东则与浮游植物吸收营养盐有关。下层水中营养盐变化较复杂。1 月,除河口  $E_2$  站仍保留跃层,受江水影响较明显外,其他各站跃层消失,由于水体垂直对流,盐度和溶解氧垂直变化很小,营养盐浓度上下差异也较小,有的站  $\text{NH}_4\text{-N}$  变化大可能与生物不断分解及其进一步氧化有关。5 月,长江径流量增加,跃层又复出现,浮游植物开始进入繁殖生长期,营养盐垂直变化较为复杂。

营养盐的断面分布以 G 断面为例, 8 月和 1 月的分布见图 8。  $\text{PO}_4\text{-P}$  (除 1 月稍有不同外),  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  和  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度从  $G_1$  至  $G_5$  站一般均有逐步下降的趋势,与盐度的上升趋势相反,其中以  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  和  $\text{NO}_3\text{-N}$  下降的梯度最大。5, 8, 10 月等值线分层较

明显, 11 月分层仅限于  $G_4$  站以西水域, 1 月上下水体较为均匀, 浓度变化小。 $SiO_3-Si$  和  $NO_3-N$  各月浓度分布较相似, 一般是上层高, 下层低, 特别在近河口处最明显, 这是受长江水输入的影响; 8 月, 远离河口处则相反, 上层低、下层高, 这与生物影响有关。 $NO_2-N$  和  $NH_4-N$  的断面分布较复杂。8, 10 月,  $NO_2-N$  分层较明显, 浓度变化较大; 11 月垂直分布均匀; 1, 5 月, 整个断面  $NO_2-N$  浓度较低, 变化较小。 $NH_4-N$  浓度一般也是河口附近较大; 河口附近的垂直分布, 则表层浓度较大。从江口到外海, 夏季水平浓度梯度小, 分层明显; 冬季水平浓度梯度大, 垂直变化小。

**3. 长江口海区营养盐季节变化及其与长江流量和浮游植物的关系** 长江口海区 ( $123^{\circ}30' E$  以西水域) 表层营养盐平均含量的季节变化及其与长江流量(大通站流量)和浮游植物量的关系见图 9。 $PO_4-P$  浓度与长江流量 ( $Q$ ) 的关系不甚明显, 而与浮游植物的消长有一定的关系。如 9 月份浮游植物量猛增, 其浓度下降, 10 月降到  $0.4 \mu mol/L$  以下; 秋冬季 (11—3 月), 浮游植物繁殖处于低潮时, 浓度较高; 5 月以后, 浮游植物量迅速上升,  $PO_4-P$  含量又趋减少。但是, 总的来讲,  $PO_4-P$  浓度的全年变化较小。 $SiO_3-Si$  和  $NO_3-N$  的季节变化较相似。8 月,  $Q$  较大时, 含量较高; 9 月, 由于浮游植物的大量摄取, 浓度有所降低; 10 月, 浮游植物骤降, 长江流量仍较高, 其浓度迅速回升, 至 11 月达

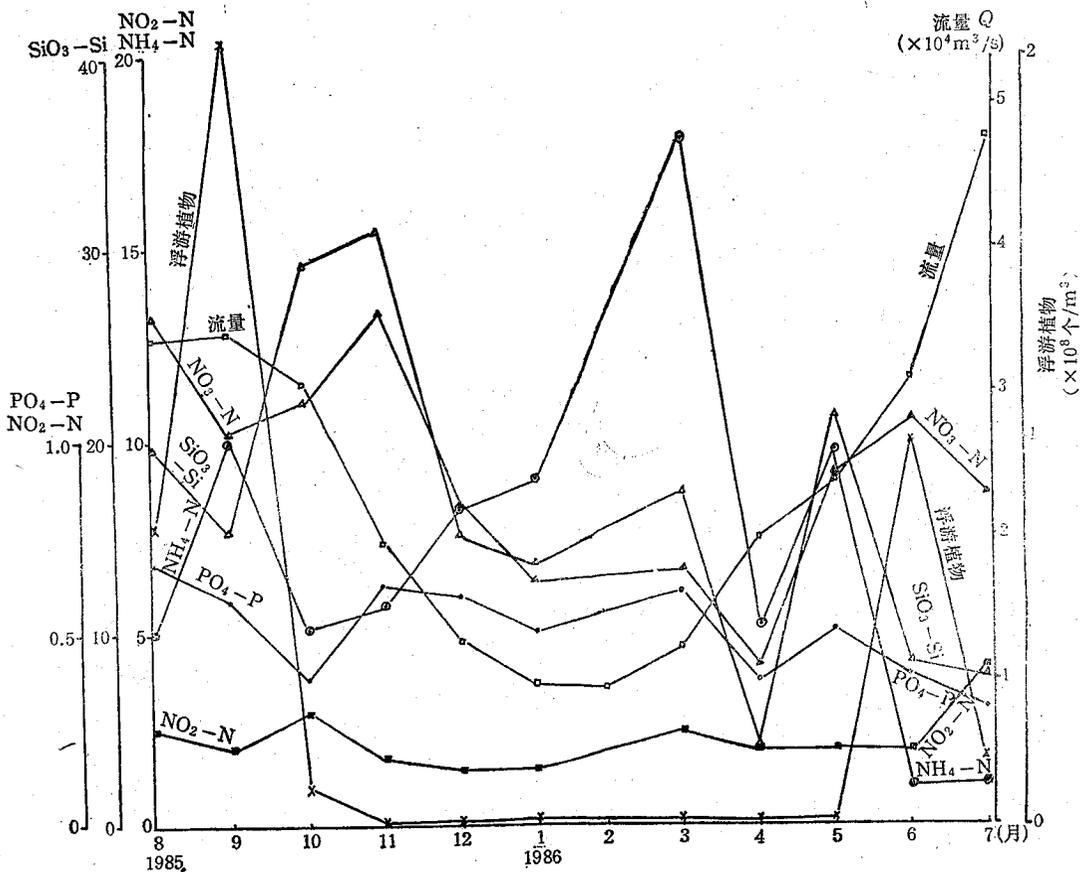


图9 长江口海区营养盐 ( $\mu mol/L$ ) 季节变化及与长江流量和浮游植物的关系

到全年最大值(分别为 30.9 和 13.3  $\mu\text{mol/L}$ ); 冬季, 长江处于枯水期, 它们的浓度均较低, 4 月降到全年最低值; 以后, 随着  $Q$  增大, 其浓度快速增加, 但当浮游植物进入繁殖生长期, 它们的浓度又随之有下降趋势。  $\text{NO}_2\text{-N}$  浓度全年均很低, 总的趋势是夏季较高, 冬季较低。  $\text{NH}_4\text{-N}$  的季节变化规律是冬季高, 从 10 月份开始, 浓度迅速上升, 3 月达到全年最大值, 为 17.8  $\mu\text{mol/L}$ ; 夏季浓度低, 6 月最小, 平均不足 1  $\mu\text{mol/L}$ 。  $\text{NH}_4\text{-N}$  浓度与长江流量呈线性负相关关系 ( $r = -0.629$ ,  $n = 11$ ), 表明海区  $\text{NH}_4\text{-N}$  浓度的季节变化主要受长江流量的影响。

综观营养盐浓度的季节变化,  $\text{PO}_4\text{-P}$ ,  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  和  $\text{NO}_3\text{-N}$  有共同特点: 11 月, 长江从丰水向枯水过渡时, 它们的浓度达到最大值 ( $\text{PO}_4\text{-P}$  接近最大值); 4 月, 长江从枯水向丰水过渡时, 它们的浓度则下降到最低点 ( $\text{PO}_4\text{-P}$  为次低点); 11 和 4 月的长江流量非常接近, 不足  $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

**4. 长江口内(河水段)营养盐浓度和输出量的季节变化及其与长江流量的关系** 长江口内表层营养盐浓度的季节变化及其与长江流量的关系见图 10。  $\text{PO}_4\text{-P}$  和  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度与流量的变化较为一致。春夏季流量增加时, 它们的浓度亦较高,  $\text{PO}_4\text{-P}$  浓度与海水中的浓度一致, 以 8 月最高,  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度以 4—7 月较高; 最低值都在 3 月份。  $\text{PO}_4\text{-P}$

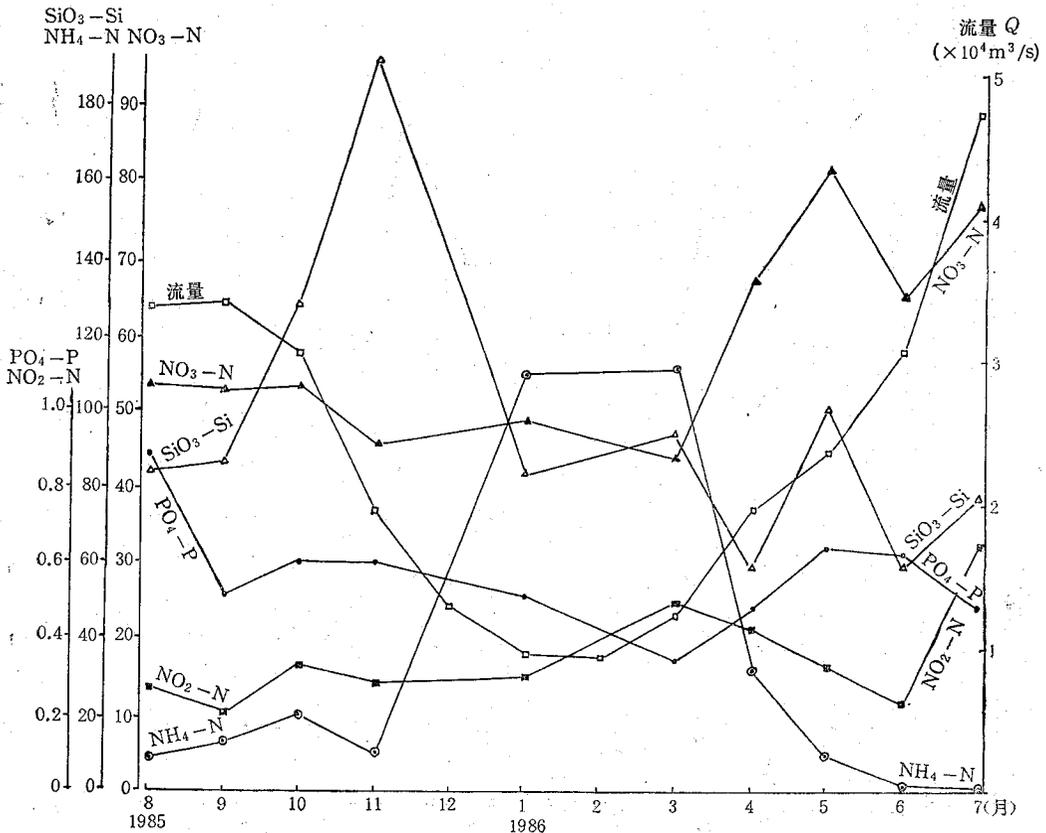


图 10 长江口内营养盐 ( $\mu\text{mol/L}$ ) 季节变化及其与流量的关系

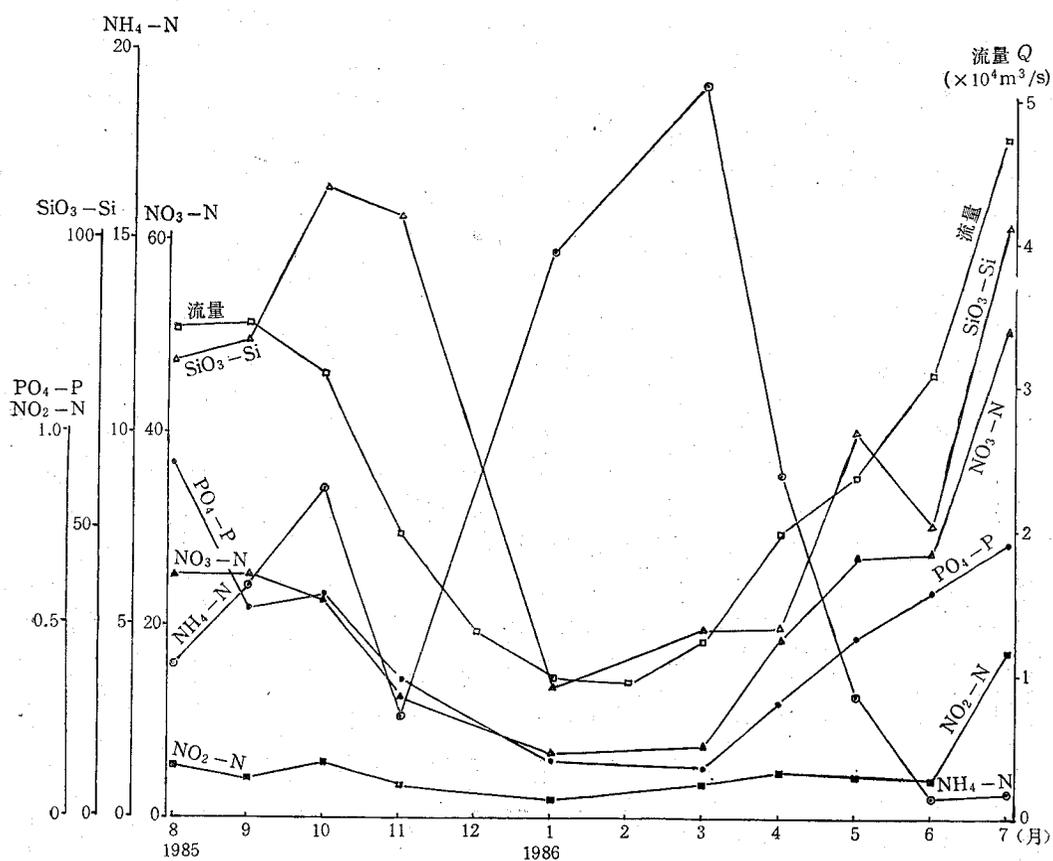


图 11 长江营养盐输出量 (kg/s) 季节变化及其与流量的关系

浓度全年变化不大。河口内  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  和  $\text{NO}_2\text{-N}$  浓度与流量无一定关系,但季节变化趋势与海水中相似,其中  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  浓度以 11 月最高,4 月最低;  $\text{NO}_2\text{-N}$  浓度以 7 月最高。 $\text{NH}_4\text{-N}$  浓度变化趋势与流量成线性负相关 ( $r = -0.770$ ,  $n = 10$ ), 冬季高,3 月份最高,夏季 6,7 月最低,也与海水中  $\text{NH}_4\text{-N}$  浓度变化相似。总无机 N 与流量之间也呈线性负相关关系 ( $r = -0.702$ ,  $n = 10$ )。

根据长江口内营养盐浓度和长江流量,可以得到每月经长江输出的营养盐量、长江营养盐输出量的季节变化及其与流量的关系(见图 11)。从图 11 可以清楚地看出,  $\text{PO}_4\text{-P}$ ,  $\text{SiO}_3\text{-Si}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$  和  $\text{NO}_2\text{-N}$  输出量与  $Q$  的变化非常一致,  $\text{NO}_3\text{-N}$  和  $\text{PO}_4\text{-P}$  尤其如此(图 12),  $\text{NH}_4\text{-N}$  则与  $Q$  呈指数负相关。它们的相关方程式如下:

$$\text{PO}_4\text{-P} = 0.110\exp(0.0000497Q) \quad (r = 0.880, n = 10)$$

$$\text{SiO}_3\text{-Si} = 23.070\exp(0.0000366Q) \quad (r = 0.735, n = 10)$$

$$\text{NO}_3\text{-N} = 4.899\exp(0.0000518Q) \quad (r = 0.929, n = 10)$$

$$\text{NO}_2\text{-N} = 0.0342\exp(0.0000446Q) \quad (r = 0.850, n = 10)$$

$$\text{NH}_4\text{-N} = 29.212\exp(-0.0000759Q) \quad (r = -0.692, n = 10)$$

$$\Sigma\text{N} = 16.270\exp(0.0000208Q) \quad (r = 0.754, n = 10)$$

表 1 长江口海区营养盐浓度与盐度的相关系数表

月份	水层	盐度范围	PO <sub>4</sub> -P		SiO <sub>3</sub> -Si		NO <sub>3</sub> -N		NO <sub>2</sub> -N		NH <sub>4</sub> -N		ΣN	
			r	n	r	n	r	n	r	n	r	n	r	n
8	各层次	0-34.5 (NO <sub>2</sub> -N 为 0-30)	-0.177	153	-0.815	153	-0.889	153	-0.206	63	-0.696	152	-0.901	152
9	表层	0-31.7	-0.086	39	-0.819	39	-0.816	39	-0.309	39	-0.298	39	-0.788	39
10	各层次	0-33.6 (NO <sub>2</sub> -N 为 0-30)	-0.625	149	-0.871	150	-0.921	150	-0.602	70	-0.610	150	-0.881	150
11	各层次	0-33.8 (NO <sub>2</sub> -N 为 0-30)	-0.249	115	-0.918	114	-0.933	114	-0.778	45	-0.410	115	-0.916	114
12	表层	15-33.2	-0.630	36	-0.914	35	-0.910	36	-0.235	36	-0.732	36	-0.904	36
1	各层次	0-33.7	-0.145	109	-0.925	109	-0.964	109	-0.596	108	-0.913	109	-0.942	109
3	表层	0-34.0	0.063	43	-0.898	43	-0.920	43	-0.768	43	-0.904	43	-0.927	43
4	表层	0-33.7	-0.834	36	-0.936	36	-0.940	36	-0.778	36	-0.915	36	-0.943	36
5	各层次	0-33.6	-0.183	123	-0.888	123	-0.905	123	-0.535	123	-0.110	122	-0.898	122
6	表层	0-31.1	-0.864	37	-0.781	37	-0.860	37	-0.681	36	0.040	37	-0.856	37
7	表层	0-31.1	-0.645	39	-0.761	39	-0.796	39	-0.672	39	0.313	39	-0.789	39

式中, 营养盐输出量的单位为  $\text{kg/s}$ ,  $Q$  的单位为  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

上述关系式中相关系数都超过 99% 或 95% 置信水平的临界值, 有显著的相关性, 表明营养盐的输出量主要决定于  $Q$  的大小, 其中  $\text{NH}_4\text{-N}$  的输出量与  $Q$  呈负相关关系是由于长江水中的  $\text{NH}_4\text{-N}$  主要源自人类活动。

### 5. 营养盐在河口的转移过程

对长江口海区营养盐浓度和盐度进行相关统计, 它们之间的相关系数以及统计范围列于表 1。从表 1 可以看出, 各月  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  与  $S$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$  与  $S$  和  $\Sigma\text{N}$  与  $S$  的相关性较好 (置信水平在 99% 以上), 冬季优于夏季。由于  $\text{NO}_2\text{-N}$  和  $\text{NH}_4\text{-N}$  受诸多因素的影响, 它们和盐度的关系较复杂, 相关性较差。营养盐与盐度之间的线性关系表明, 在长江口海区, 营养盐从河口向海洋转移的过程中, 物理混合起着重要的作用。但是长江口海区浮游植物量很高, 上层浮游植物大量摄取营养盐, 一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。所以, 长江口无机  $\text{N}$  和  $\text{Si}$  的转移除了海水稀释作用外, 还有明显的生物转移, 这同它们与  $S$  的相关系数偏低相一致。以浮游植物量较高的 8 月份为例, 从图 13a, b 可以清楚地看出, 许多点 (以表层水为主) 都在理论稀释线下方, 表明  $\text{NO}_3\text{-N}$  和  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  通过生物转移了; 在  $S > 30$  的区域, 许多点 (以下层水为主) 都在该线上方, 表明有机物分解释放  $\text{NO}_3\text{-N}$  和  $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 。这一现象在其他月份也都存在。从相关图还可以看出,  $\text{NO}_3\text{-N}$  和  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  随盐度  $S$  的变化比较一致, 表明它们的转移主要是通过生物进行的。 $\text{NO}_3\text{-N}$  和  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  呈显著正相关:

$$\text{NO}_3\text{-N}(\mu\text{mol/L}) = 0.913 + 0.582\text{SiO}_3\text{-Si}(\mu\text{mol/L}) \quad (r = 0.936, n = 151)$$

$\text{PO}_4\text{-P}$  与盐度的相关性较差, 许多月份无相关性。 $\text{PO}_4\text{-P}$  在河口除了物理混合过程和生物转移外, 还存在着其他转移过程。其分布 (无论是平面还是垂直分布) 与  $\text{NO}_3\text{-N}$  和  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  不尽相同, 如 9, 10, 11, 1, 3 和 7 月, 江口外表层  $\text{PO}_4\text{-P}$  浓度要比河口内高许多 (上海市海岸带调查中也遇到类似情况), 有的月份比较均匀。笔者曾报道过长江口  $\text{PO}_4\text{-P}$  的转移 (沈志良等, 1987), 发现 1983 年 10 月长江口附近海域, 在盐度 0—30 的

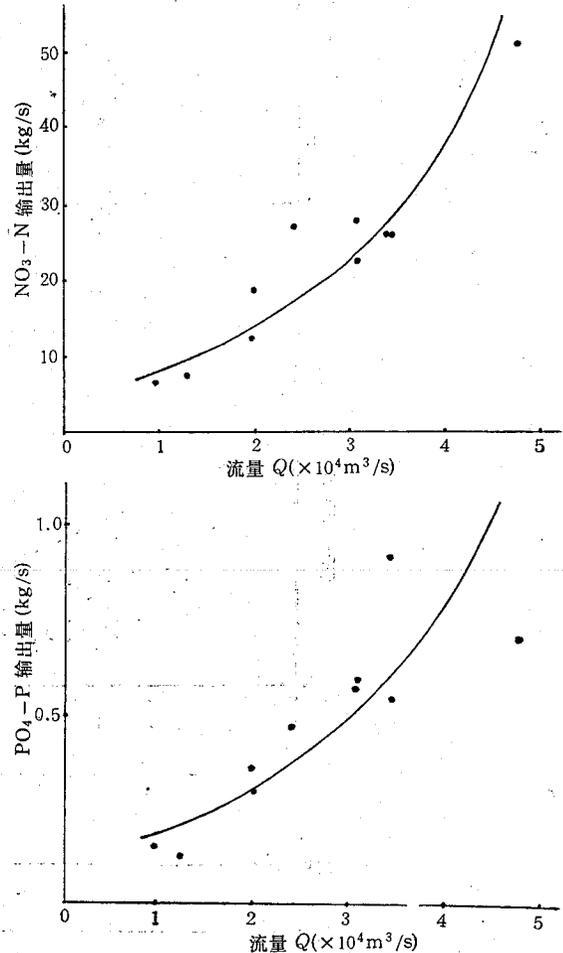
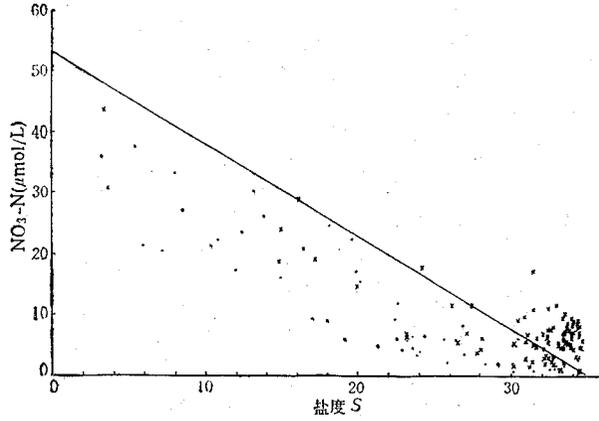
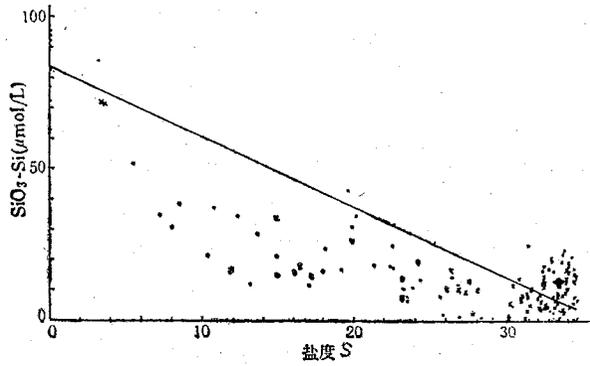
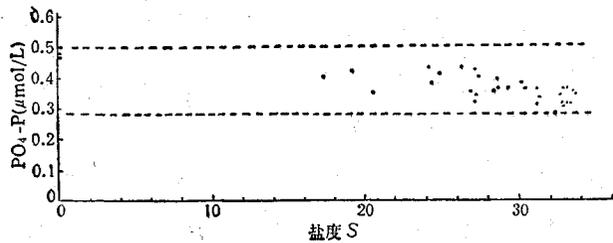


图 12  $\text{PO}_4\text{-P}$  和  $\text{NO}_3\text{-N}$  输出量与流量的关系

图 13a 8月  $\text{NO}_3\text{-N}$  与盐度  $S$  的关系

●表层; ×表层以下各层(下同)

图 13b 8月  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  与盐度  $S$  的关系图 13c 4月  $\text{PO}_4\text{-P}$  与盐度  $S$  的关系

范围内, 表层  $\text{PO}_4\text{-P}$  浓度为  $32.8 \pm 4.0 \mu\text{g/L}$ 。本次调查, 4月份调查水域 ( $S = 0 - 33.7$ ) 表层的  $\text{PO}_4\text{-P}$  浓度变化很小(图 13c), 浓度介于  $0.28 - 0.50 \mu\text{mol/L}$  之间。其他月份, 如 8, 11 月, 整个水体在  $S = 0 - 30$  的范围内,  $\text{PO}_4\text{-P}$  浓度在  $0.5 - 1.0 \mu\text{mol/L}$  之间变化(个别例外)。许多学者已经通过现场和实验室试验证明了河口悬浮体和沉积物与水中  $\text{PO}_4\text{-P}$  之间的交换, 悬浮体有从高磷淡水中吸附  $\text{PO}_4\text{-P}$  的趋势, 而在低磷的咸淡水交汇区则将其释放回水中 (Carritt and Goodgal, 1954; Pomeroy *et al.*, 1965;

Butler and Tibbitts, 1972)。长江年平均输沙量达 5 亿吨, 占世界第四位, 研究表明(杨光复等, 本集), 由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, 沉积一再悬浮一再沉积过程, 随季节而变化, 这就加速了  $\text{PO}_4\text{-P}$  在水、悬浮体和沉积物之间的交换, 有助于其在水中的含量保持在一定的水平, 从而维持浮游植物繁殖的需要。本调查区  $\text{PO}_4\text{-P}$  的这种分布特征可能反映了悬浮体、沉积物在控制海水中  $\text{PO}_4\text{-P}$  浓度的变化方面起着重要作用。

**6. 营养盐与水域生产力** 调查表明, 20 多年来长江口海区无机 N 大量增加(顾宏堪等, 1981), 河口内  $\text{NO}_3\text{-N}$  和  $\text{NH}_4\text{-N}$  浓度平均最高达  $81.6 \mu\text{mol/L}$  (5 月) 和  $111 (3 \text{ 月}) \mu\text{mol/L}$ , 整个调查期间未见有分析零的情况。这主要是由于长江沿岸化肥使用量大量增加以及生产和生活污水排放量急剧上升所致。然而丰富的无机 N 和 Si 都不会成为浮游植物生长的限制因素。据有关文献报道 (Baturin, 1978), 混浊河水悬浮体中的  $\text{PO}_4\text{-P}$  占河水中  $\text{PO}_4\text{-P}$  总量的 80—90%。可见河水中丰富的悬浮态  $\text{PO}_4\text{-P}$  通过转化成溶解无机 P 来满足浮游植物生长的需要, 同时浮游植物也能直接利用有机 P。因此, 本次调查长江口海区表层  $\text{PO}_4\text{-P}$  年平均浓度虽达  $0.50 \mu\text{mol/L}$ , 一般地讲, 在河水影响到的水域,  $\text{PO}_4\text{-P}$  不会对浮游植物的生长起限制作用。这个问题还有待进一步研究。

根据各月长江口内营养盐浓度和长江流量, 计算的营养盐年输出量列于表 2。长江入海口河水中无机 N 和  $\text{PO}_4\text{-P}$  的含量均比黄河小, 但是输出量却比黄河高得多(沈志良等, 1989)。以无机 N 量估算, 若全部用于浮游植物的光合作用, 可生产 504.3 万吨有机碳。

表 2 营养盐年输出总量

营养盐	$\text{PO}_4\text{-P}$	$\text{SiO}_3\text{-Si}$	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NO}_2\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$	$\Sigma\text{N}$
输出总量 ( $\times 10^4\text{t/a}$ )	1.4	204.4	63.6	0.38	24.9	88.8

长江源源不断地向东海输送大量的营养盐, 对发展长江口海区水域生产力有十分重要的意义。但是过量营养盐的输入不利于浮游植物的生长, 逐年来长江口无机 N 大量增加, 氮磷比异常高。1982 年 8 月东海水产研究所在本海区曾观察到两次赤潮, 本次调查中 5 月份也发生赤潮, 表明长江口海区富营养化日趋严重, 必须引起人们的高度重视。

### 三、三峡工程对长江口海区营养盐分布变化的影响

**1. 三峡工程对营养盐输出量的影响** 三峡水库建成后, 10—12 月长江下泄流量将减少, 根据 150 m 和 180 m 调节方案, 10 月份变化最大, 下泄流量分别减少 2 880 和  $7\ 000 \text{ m}^3/\text{s}$ 。假定水库以下来水条件保持不变, 利用营养盐输出量-长江流量关系方程式, 可以粗略计算得到 150 m 和 180 m 方案时营养盐输出量可能发生的变化(列于表 3)。与本次调查相比, 150 m 方案时, 营养盐月输出量将减少:  $\text{PO}_4\text{-P}$ , 175t, 占 13%;  $\text{SiO}_3\text{-Si}$ , 18 378t, 占 9.7%;  $\Sigma\text{N}$ , 4 650t, 占 5.7%。180 m 方案时, 将减少:  $\text{PO}_4\text{-P}$ , 395t, 占

表3 三峡工程建成后10月份营养盐输出量的可能变化

营养盐	1985年10月输出量		150m方案输出量		180m方案输出量	
	kg/s	t/月	kg/s	t/月	kg/s	t/月
PO <sub>4</sub> -P	0.50	1342	0.44	1167	0.35	947
SiO <sub>3</sub> -Si	70.4	188 680	63.0	170 302	54.5	146 036
ΣN	30.7	82 183	28.9	77 533	26.5	71 047

29%；SiO<sub>3</sub>-Si, 42 644t, 占23%；ΣN, 11 136t, 占14%。如遇枯水年, 以1959年10月为例(长江流量为16 800 m<sup>3</sup>/s), PO<sub>4</sub>-P, SiO<sub>3</sub>-Si和ΣN的输出量分别为679, 114 278和61 805 t。若按150 m方案, 减少量为: PO<sub>4</sub>-P, 88t, 占13%；SiO<sub>3</sub>-Si, 11 131 t, 占9.7%；ΣN, 34 97t, 占5.7%。按180 m方案, 则减少量为: PO<sub>4</sub>-P, 199 t, 占29%；SiO<sub>3</sub>-Si, 25 828t, 占23%；ΣN, 8 374t, 占14%。上述结果表明, 180 m方案的影响比150 m方案大得多。

根据水库调节方案, 1—4月下泄流量增加, 按150 m方案将增加1 000 m<sup>3</sup>/s, 按180 m方案将增加2 000—2 500 m<sup>3</sup>/s。下泄流量增加, 营养盐输出量也将相应增加。

**2. 三峡工程对长江口海区营养盐分布的影响** 水库10月蓄水, 营养盐输出量减少, 必将引起长江口海区营养盐浓度的降低和分布的变化。从营养盐特别是无机N和SiO<sub>3</sub>-Si与盐度月际分布变化可以看出, 随着长江流量的减少, 长江冲淡水面积亦减少, 营养盐高浓度区向河口收缩。统计表明, 10月, 表层水中的总无机N和SiO<sub>3</sub>-Si浓度与盐度S有如下线性负相关关系:

$$\Sigma N(\mu\text{mol/L}) = 54.3 - 1.573S \quad (r = -0.900, n = 42)$$

$$\text{SiO}_3\text{-Si}(\mu\text{mol/L}) = 110.7 - 3.413S \quad (r = -0.899, n = 42)$$

根据以上二式可得:

$$\text{当 } S = 30 \text{ 时, } \Sigma N = 7.1(\mu\text{mol/L})$$

$$\text{SiO}_3\text{-Si} = 8.2(\mu\text{mol/L})$$

研究表明, 10月长江流量减少所引起的冲淡水面积( $S < 30$  所包括的面积)的减少, 按150 m方案, 为1 800多平方公里, 按180 m方案则为4 500多平方公里(张法高等, 1987)。若按上述关系式则可预计, ΣN大于7 μmol/L和SiO<sub>3</sub>-Si大于8 μmol/L的区域大致也将随冲淡水面积的减少而缩小, 调查区营养盐的平均浓度将下降。

三峡工程完成后的前10年, 将有60—70%的泥沙淤积在库内, 下泄泥沙量减少, 能改善长江口海区海水的透明度, 有利于浮游植物的光合作用, 浮游植物密集区可能向河口移动。河口附近为营养盐的高浓度区, 也有可能引起浮游植物的异常繁殖, 从而造成危害。

河口区营养盐由于受物理、化学和生物等多种因素的影响, 变化十分复杂, 而营养盐变化所引起的河口生态的变化更为复杂。以上所述仅是根据有限的资料进行初步讨论, 还须进一步研究。

### 参 考 文 献

刁焕祥, 1983, 自动分析仪次溴酸钠氧化法测定海水中氨氮的研究, 海洋科学, 1: 25—28。

- 刁焕祥、刘兴俊, 1985, BSPB 自动分析法测定海水中硝酸盐的研究, 海洋学报, 7(3): 374—377。
- 杨光复等, 1992, 三峡工程对长江口外海区沉积结构及地球化学特征的影响, 海洋科学集刊, 本集。
- 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。
- 沈志良、陆家平、刘兴俊, 1989, 黄河口及其附近海域的无机氮和磷酸盐, 海洋科学集刊, 30: 51—79。
- 张法高、杨光复、沈志良, 1987, 三峡工程对长江口水文、水化学和沉积环境的影响, 长江三峡工程对生态与环境的影响及其对策研究论文集, 科学出版社, 373。
- 顾宏堪等, 1981, 长江口附近氮的地球化学 I. 长江口附近海水中的硝酸盐, 山东海洋学院学报, 11(4): 37—46。
- Baturin, G. N. (translated by D. B. Vitaliano), 1982, Phosphorites on the Sea Floor, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam-Oxford-New York, 9—12.
- Butler, E. I. and S. Tibbitts, 1972, Chemical Survey of the Tamar estuary I. Properties of the Waters, *J. Mar. Biol. Ass. U. K.*, 52: 681—699.
- Carritt, D. E. and S. Goodgal, 1954, Sorption reactions and some ecological implications, *Deep-Sea Research*, 1: 224—243.
- Pomeroy, L. R., E. E. Smith and C. M. Grant, 1965, The exchange of phosphate between estuarine water and sediments, *Limnol. Oceanogr.*, 10(2): 167—172.

## DISTRIBUTION CHARACTERS OF THE NUTRIENTS IN THE CHANGJIANG RIVER ESTUARY AND THE EFFECT OF THE THREE GORGES PROJECT ON IT\*

Shen Zhiliang, Lu Jiaping, Liu Xingjun and Diao Huanxiang  
(*Institute of Oceanology, Academia Sinica*)

### ABSTRACT

Based on the investigations of the nutrients in the Changjiang River Estuary and its adjacent waters during Aug. 1985 to Jul. 1986, the spatial-temporal distributions and changes of the nutrients (P, Si and N) and their removal processes in the estuary and the relationship among the nutrients, the flow of the Changjiang River and phytoplankton are discussed. The relation equations between the transports of the nutrients from Changjiang River water into sea and the flow of the Changjiang River are presented. The annual transports of the  $\text{PO}_4\text{-P}$ ,  $\text{SiO}_2\text{-Si}$ , and total inorganic N from Changjiang River water into the sea are estimated to be  $1.4 \times 10^4$ ,  $204.4 \times 10^4$  and  $88.8 \times 10^4$  tons respectively. The effects of the Three Gorge Project on the distributions and changes of the nutrients in the Changjiang River Estuary and its adjacent waters are forecasted.

\* Contribution No. 2058 from the Institute of Oceanology, Academia Sinica.