

黄河口及其附近海域的无机氮和磷酸盐*

沈志良 陆家平 刘兴俊

(中国科学院海洋研究所)

河水径流是海洋营养盐最重要的来源之一。河流排放的营养盐为河口海区自养生物的繁殖提供了重要保证,但是过量的营养盐反会引起海水污染和水域富营养化,从而危及海洋生物的生命活动。研究河口及其附近海域营养盐的分布变化,不仅对了解它们在河水-海水界面的转移规律,而且对河口生态学的研究均具有重要意义,因此日益受到重视(顾宏堪等,1981;王正芳等,1983;林植青等,1984;吕小乔等,1985;沈志良等,1987)。

本文主要对黄河口及其附近海区水中硝酸盐、亚硝酸盐、氨氮和磷酸盐的分布特征、在河口的转移过程以及它们与浮游植物的关系等进行一些探讨。

一、调查和方法

调查范围为 $117^{\circ}54' - 119^{\circ}35'E$, $37^{\circ}15' - 38^{\circ}34'N$, 共设 48 个大面观测站,另设垦利县西双河渡口黄河水取样站 1 个,详见图 1。调查时间为 1984 年 4—11 月(黄河水取样延至次年 3 月,1 月未调查),其中 5, 6, 8, 11 月作了大部分站的代表水层调查,4, 9, 10 月仅进行表层观测。

全部水样存放在聚乙烯瓶中,加 0.3% 氯仿固定,在 $-25^{\circ}C$ 低温冰箱内储存,待回实验室后进行测定。硝酸盐以 BSPB 法(刁焕祥等,1985),亚硝酸盐以重氮偶氮法,氨氮用次溴酸钠氧化法(刁焕祥,1983),磷酸盐沿用磷钼蓝法(以氯化亚锡为还原剂)测定。以上诸参数均用美国 Technicon AA-2 型自动分析仪进行比色分析,分析误差为 $\pm 10\%$ 。

本文各参数所用符号及单位如下:硝酸盐—— NO_3^- ,亚硝酸盐—— NO_2^- ,氨氮—— NH_4^+ ,总无机氮—— ΣN ,磷酸盐—— PO_4^{3-} ; (单位均为 $\mu mol/L$) 氮磷原子比—— $\Sigma N/P$; 盐度—— $S(\text{‰})$; 浮游植物—— $PTP (\times 10^4 \text{ 个细胞}/m^3)$; 黄河水流量—— $Q(m^3/s)$ 。

二、结果和讨论

1. 平面分布 具有季节代表性的 5, 8, 11 月 S , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} 及 $\Sigma N/P$ 等参数在表层、底层水中的平面分布见图 2—4。4—11 月营养盐变化范围及表、底层平均

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 1326 号。

马锡年、李全生、沈万仁和本所浮游植物组同志协助采集部分水样及提供盐度和浮游植物数据,李延同志提供 BSPB 试剂,杨鹤鸣、孙作庆等同志在数据处理计算中给予了热情帮助,胜利油田卫生处防疫站对本工作给予了大力支持,顾宏堪研究员审阅全文,马锡年同志对本文提出了宝贵意见,特此致谢。

收稿日期:1986 年 5 月 19 日。

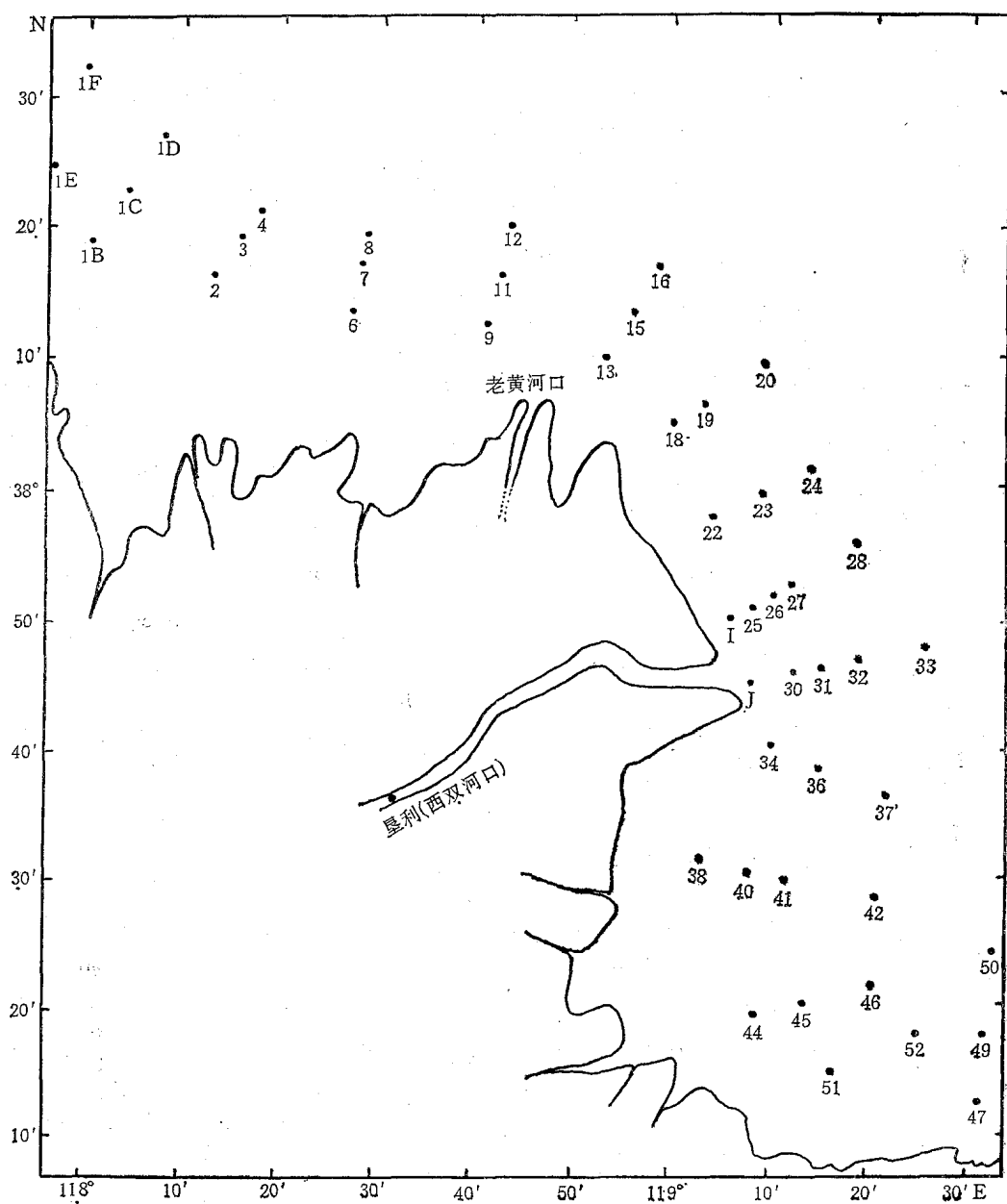


图1 站位图

浓度列于表1中。

表层 S 分布表明, 黄河冲淡水的主要影响区在 38°N 以南水域, 本文称为黄河口海区, 该区西北部称为西北部海区。由于黄河淡水的影响, 形成了 S 在河口附近低, 河口外海域高的分布。在黄河大汛期的8月份, 冲淡水势力增强, 形成了从河口向东北方向延伸的低盐水舌, 其前锋可达 38°N 以北, 该处 S 小于22。底层水主要受密度大的海水控制, 表现为 S 高, 受黄河水影响较小。

从图2—4和表1可以看出, 黄河口区表层无机氮和磷酸盐总的分布趋势是河口高,

表 1 营养盐浓度

月份	参数	变化范围		表层平均		底层平均		表、底平均		总平均
		西北部	黄河口	西北部	黄河口	西北部	黄河口	西北部	黄河口	
4	NO_3^-	3.4—11	1.3—21	6.3	8.8					7.6
	NO_2^-	0.16—0.46	0.07—0.57	0.30	0.21					0.25
	NH_4^+	2.6—>13	4.3—13	>8.5	7.7					>8.1
	ΣN	9.7—>24	6.3—31	>15	17					>16
	PO_4^{3-}	0.18—0.83	0.04—0.56	0.45	0.24					0.34
	$\Sigma\text{N/P}$	15—95	28—394	>33	71					>47
5	NO_3^-	0—2.6	0—24	1.0	4.4	1.5	1.2	1.2	3.4	2.5
	NO_2^-	0.06—0.30	0.09—0.33	0.16	0.22	0.14	0.18	0.15	0.21	0.18
	NH_4^+	0.5—10	0.9—10	3.7	4.7	2.4	3.7	3.2	4.4	3.9
	ΣN	0.8—10	2.0—30	4.9	9.3	4.0	5.1	4.5	7.9	6.6
	PO_4^{3-}	0.17—1.0	0.05—0.87	0.55	0.41	0.62	0.36	0.58	0.39	0.47
	$\Sigma\text{N/P}$	2.8—46	3.4—91	8.9	23	6.5	14	7.7	20	14
6	NO_3^-	0—1.5	0—34	0.4	5.6	0.3	2.8	0.4	4.2	2.7
	NO_2^-	0.07—1.1	0.09—0.40	0.26	0.18	0.26	0.16	0.26	0.17	0.20
	NH_4^+	0.9—5.2	0—13	2.3	4.0	2.8	4.4	2.6	4.2	3.6
	ΣN	1.3—5.8	2.2—36	3.0	9.8	3.4	7.4	3.2	8.6	6.5
	PO_4^{3-}	0.28—1.0	0.26—0.86	0.52	0.61	0.48	0.59	0.50	0.60	0.56
	$\Sigma\text{N/P}$	2.2—14	1.8—69	5.8	16	7.1	13	6.4	14	12
7	NO_3^-	0—1.4	0—45	0.2	10	0.4	4.6	0.3	7.3	3.9
	NO_2^-	0.06—1.2	0.07—0.41	0.17	0.20	0.32	0.21	0.25	0.21	0.23
	NH_4^+	1.3—12	0.8—12	5.8	6.2	4.7	6.9	5.3	6.6	6.0
	ΣN	1.6—13	1.3—49	6.2	16	5.4	12	5.8	14	10
	PO_4^{3-}	0.21—0.85	0.13—0.84	0.52	0.54	0.48	0.47	0.50	0.51	0.51
	$\Sigma\text{N/P}$	2.8—31	3.2—72	12	30	11	26	12	28	20
8	NO_3^-	0.5—4.3	0.5—55	1.5	13	1.4	4.5	1.5	9.8	5.9
	NO_2^-	0.15—1.2	0.12—1.4	0.34	0.30	0.26	0.43	0.31	0.35	0.33
	NH_4^+	0.5—9.3	0—12	3.6	3.0	2.7	2.9	3.2	3.0	3.1
	ΣN	1.9—12	1.6—64	5.5	16	4.4	7.8	5.1	13	9.3
	PO_4^{3-}	0.31—0.97	0.22—1.3	0.60	0.47	0.66	0.46	0.62	0.47	0.54
	$\Sigma\text{N/P}$	2.4—30	2.6—88	9.2	36	6.7	17	8.2	28	17
9	NO_3^-	0.1—2.1	2.9—33	1.0	12					7.1
	NO_2^-	0.14—1.8	0.25—1.9	0.63	1.2					0.94
	NH_4^+	1.2—13	4.2—23	5.6	9.9					8.0
	ΣN	2.2—16	11—42	7.2	23					16
	PO_4^{3-}	0.22—0.60	0.11—0.64	0.40	0.26					0.32
	$\Sigma\text{N/P}$	5.2—73	34—363	18	88					50
10	NO_3^-	0.1—3.8	0.1—23	1.9	11					6.8
	NO_2^-	0.09—0.44	0.14—0.42	0.21	0.25					0.23
	NH_4^+	0.2—3.8	0.7—8.3	2.1	4.8					3.5
	ΣN	0.9—7.1	1.0—30	4.2	16					10
	PO_4^{3-}	0.36—0.93	0.18—0.78	0.69	0.35					0.51
	$\Sigma\text{N/P}$	1.4—12	1.7—81	6.1	46					20
11	NO_3^-	4.3—10	4.0—51	6.9	18	6.7	12	6.8	16	11
	NO_2^-	0.02—0.93	0.09—0.37	0.14	0.18	0.11	0.17	0.13	0.18	0.15
	NH_4^+	0.2—6.9	0—8.1	2.1	4.1	1.6	3.5	1.9	3.9	2.9
	ΣN	5.4—15	7.8—56	9.1	22	8.4	16	8.8	20	14
	PO_4^{3-}	0.37—1.8	0.24—1.1	0.76	0.46	0.92	0.49	0.83	0.47	0.64
	$\Sigma\text{N/P}$	3.2—41	13—101	12	48	9.1	33	11	43	22

向外逐渐降低,这是由于黄河水输送大量营养盐所致。表层营养盐这种分布趋势与S舌状分布相一致,其浓度随S量值增加而下降,8月份最为明显,无机氮与磷酸盐的舌状分布也转向河口东北方向。特别是 NO_3^- 和 NO_2^- ,在河口附近等值线密集,浓度变化大;在 38°N 以北有个高浓度区,那里 NO_3^- 与 NO_2^- 分别大于20及0.5,恰与该处的低盐度分布相吻合。由于黄河水的影响,表层 NO_3^- 浓度明显高于底层,8月份表层平均浓度为13,

约是底层的 3 倍, 浓度最高的 31 号站达 55。NO₃⁻ 在热力学上是不稳定的, 在海水中不可能大量存在, 表底层水中浓度均较低。NH₄⁺ 浓度的高低除受黄河水输入的影响外, 还取决于浮游植物吸收、有机物分解、浮游动物及其它水生动物的直接排泄, 另外尚有雨水的影响等。在调查期间, 黄河口区表层水中 NH₄⁺ 的平均浓度相差不大, 其中 7 月份最高, 表底层平均值分别为 6.2 及 6.9。总的看来, 该区三态无机氮中 NO₃⁻ 是主要存在形态, NH₄⁺ 的比例也较大。黄河口区表、底层 PO₄³⁻ 平均浓度比较接近, 分别在 0.24—0.61 和 0.36—

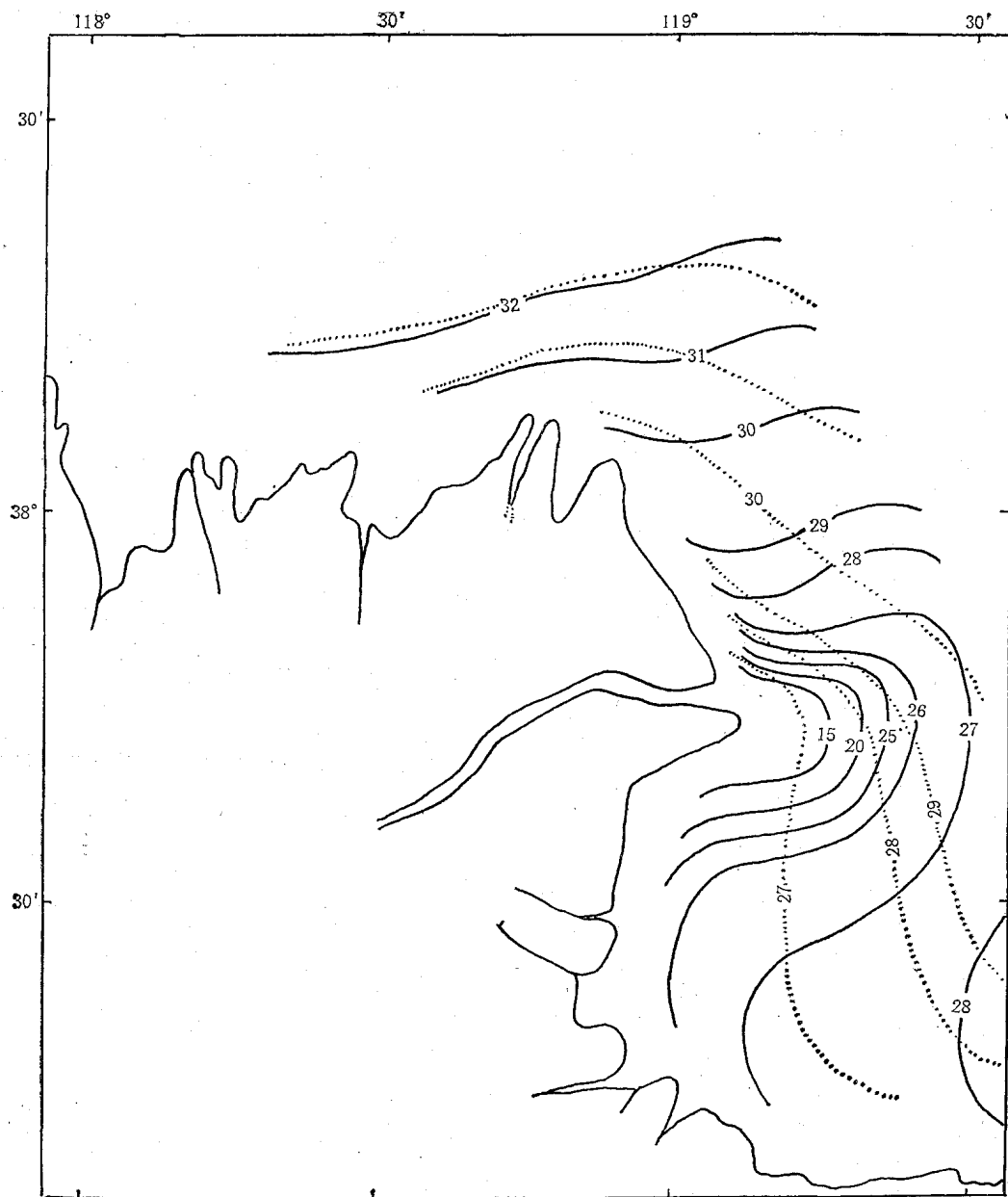


图 2a 5 月 S 平面分布

图 2—4 注: ——表层; 底层

0.59 之间。

图 2 至图 4 表明,西北部海区受黄河水系影响很小, S 一般在 30 以上,营养盐分布比较复杂。特别是 5 月份,规律性较差,有待进一步研究。8 和 11 月无机氮和磷酸盐在表、底层总的分布趋势是,近岸高,河口外海域低,比较有规律。从表 1 可以看出,西北部海区的无机氮,尤其是 NO_3^- 的浓度,比黄河口区低得多,7 月该区表、底层平均浓度仅是黄河口区的 $1/24$, 5—7 月份某些站表层水中 NO_3^- 甚至出现分析零值,这表明在该海区 NO_3^- 有时成为 PTP 繁殖的限制因素,PTP 量明显低于黄河口区便是例证。本区 NH_4^+ 浓度一

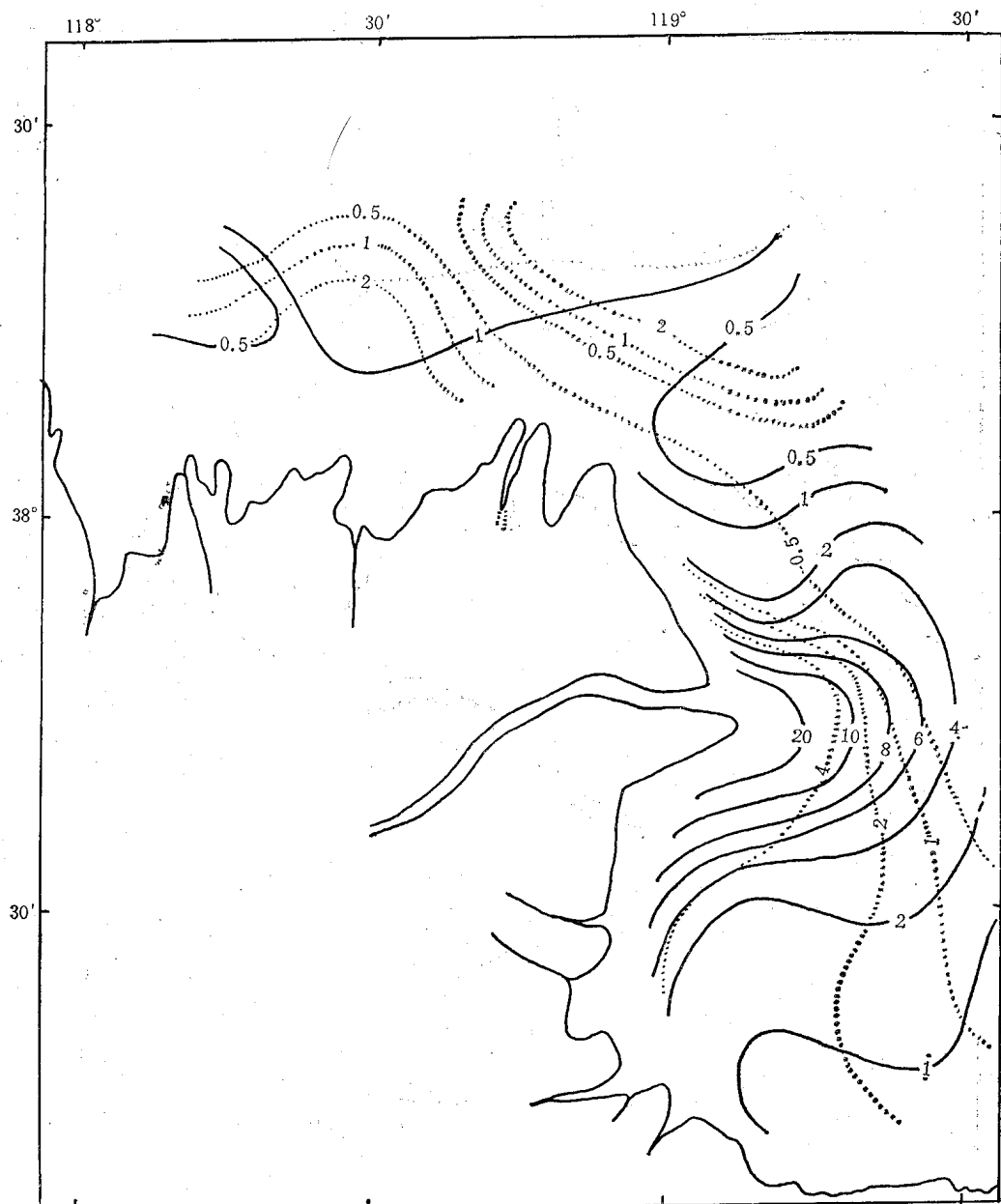


图 2b 5 月 NO_3^- 平面分布

般也低于黄河口区,但是比 NO_3^- 浓度高,是本区无机氮的主要存在形态(占 ΣN 的 60%),这表明它与长江口海域一样(顾宏堪等,1981),在生物活动较强烈的浅海水域,各态无机氮之间的热力学平衡是难以实现的。西北部海区磷酸盐平均浓度与无机氮不同,除 6,7 月外,均比黄河口区明显偏高。黄河改道前(图 1)西北部海区受黄河水系影响较大,一部分磷酸盐由泥沙吸附后沉积;其他许多小河流以及潮汐、风力等的作用也搬运来一部分沉积物质(刘仲衡等,1985);本海区水中 PO_4^{3-} 浓度较高可能与沉积物不断释放 PO_4^{3-} 有关。以 PO_4^{3-} 浓度最高的 11 月为例,表、底层及沉积物间隙水中的 PO_4^{3-} 平均浓度分别为

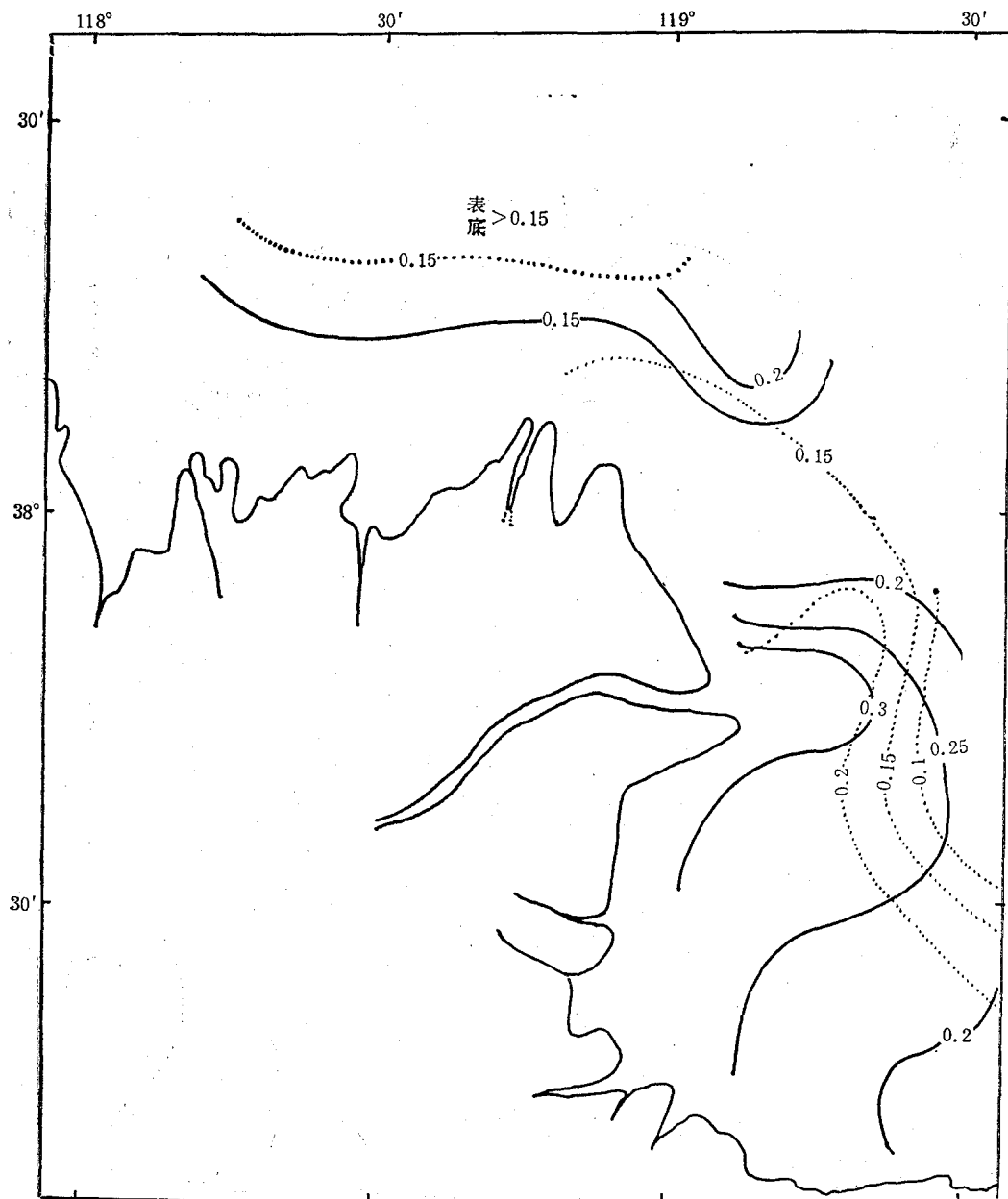


图 2c 5 月 NO_3^- 平面分布

0.76, 0.92 及 1.1; 这表明, 沉积物与底层海水之间的 PO_4^{3-} 交换比较好, 水体垂直对流又有利于把底层 PO_4^{3-} 输送到表层。下面还将进一步讨论这个问题。

调查海区 $\Sigma\text{N}/\text{P}$ 随时间和空间不同而有很大的变化, 如 37 号站表层水, 在调查期间其变化范围在 8.1—394 之间; 6 月份 27 号站表层比底层约高 6 倍; 5 月份 31—33 号站

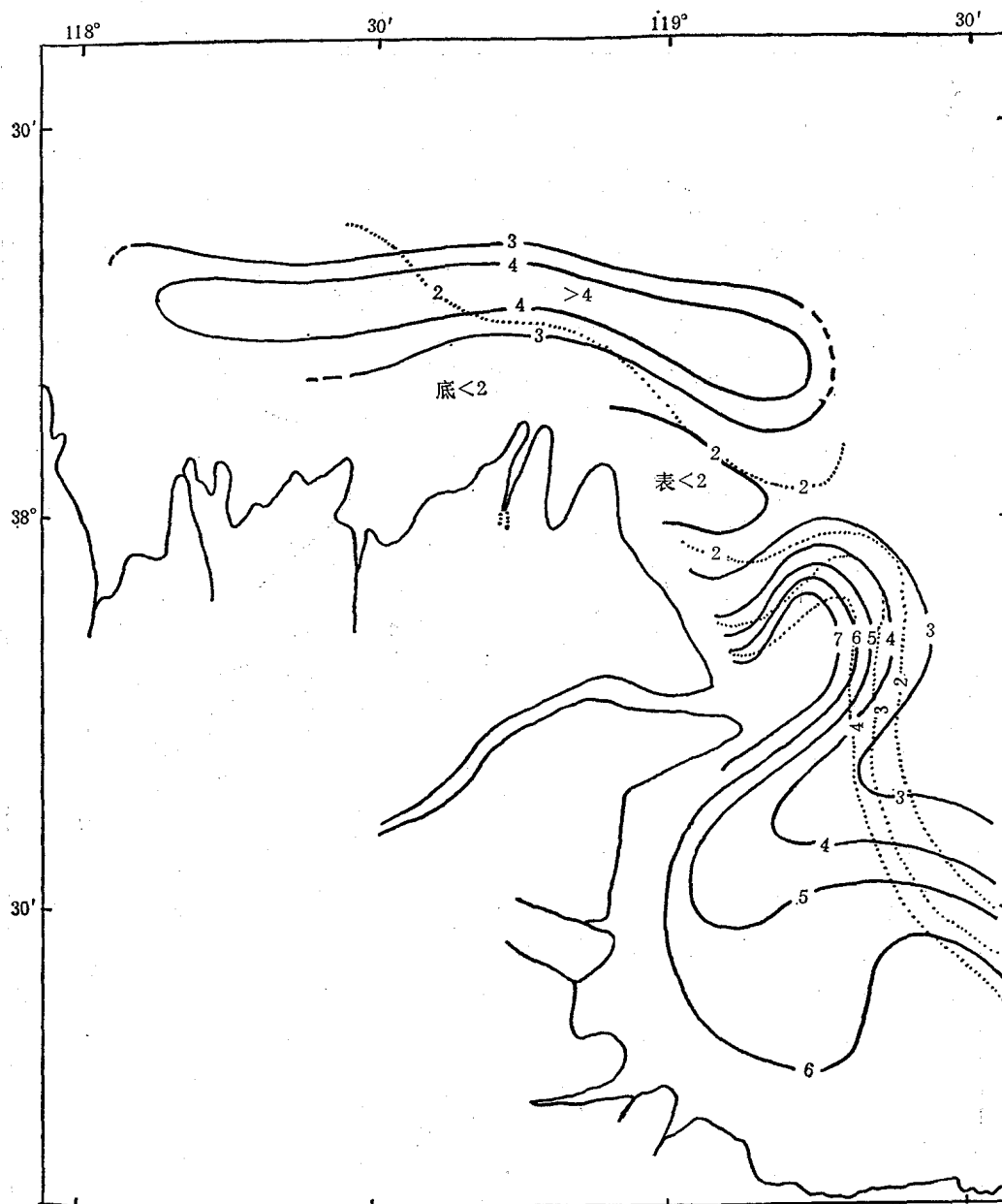


图 2d 5 月 NH_4^+ 平面分布

从 91 降至 18。 $\Sigma N/P$ 变化如此之大,并不反映浮游植物对无机氮、磷的吸收比或者有机物氧化分解的氮磷比,而主要是由于黄河淡水的影响。从 5, 8 和 11 月 $\Sigma N/P$ 平面分布图(图 2f, 3f, 4f) 和表 1 可以看出,整个调查区域 $\Sigma N/P$ 的分布趋势是,黄河口区高于西北部海区,并且变化范围大;河口高,远岸低;表层高,底层低。河口表层水中的 $\Sigma N/P$ 远

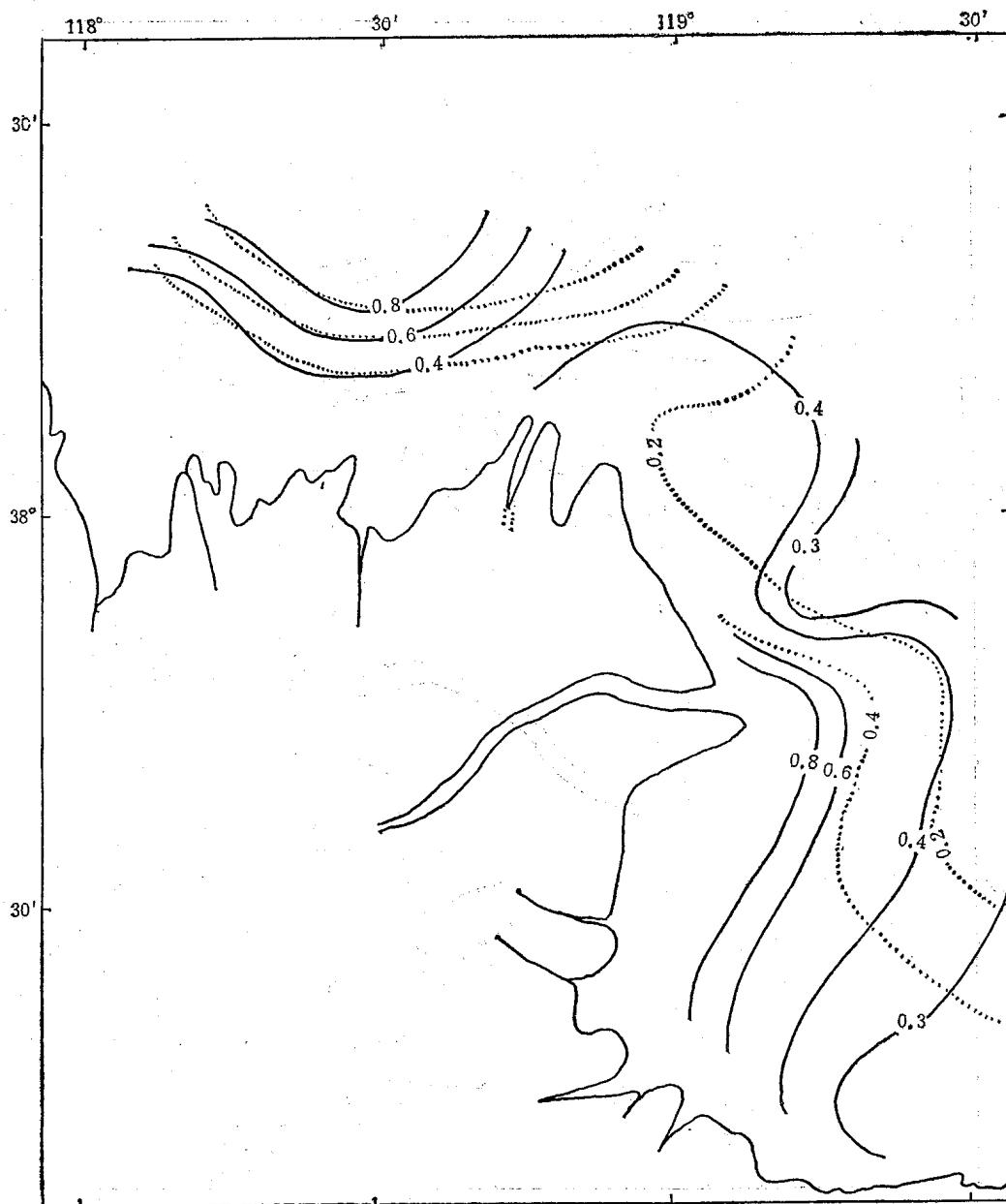


图 2c 5 月 PO_4^{3-} 平面分布

高于大洋水中的正常比 16, 这是由于黄河水输入了大量 NO_3^- ; 而 5—8 月份底层水的 $\Sigma\text{N}/\text{P}$ 平均值为 17。11 月底层水中 $\Sigma\text{N}/\text{P}$ 较高(平均为 33), 这与入秋后表底层对流加强, 黄河淡水对底层水的影响增大有关; 它与该月底层水 S 较低, NO_3^- 浓度较高相一致。在西北部海区, 由于 NO_3^- 浓度较低, PO_4^{3-} 浓度较高, 因而 $\Sigma\text{N}/\text{P}$ 较低。

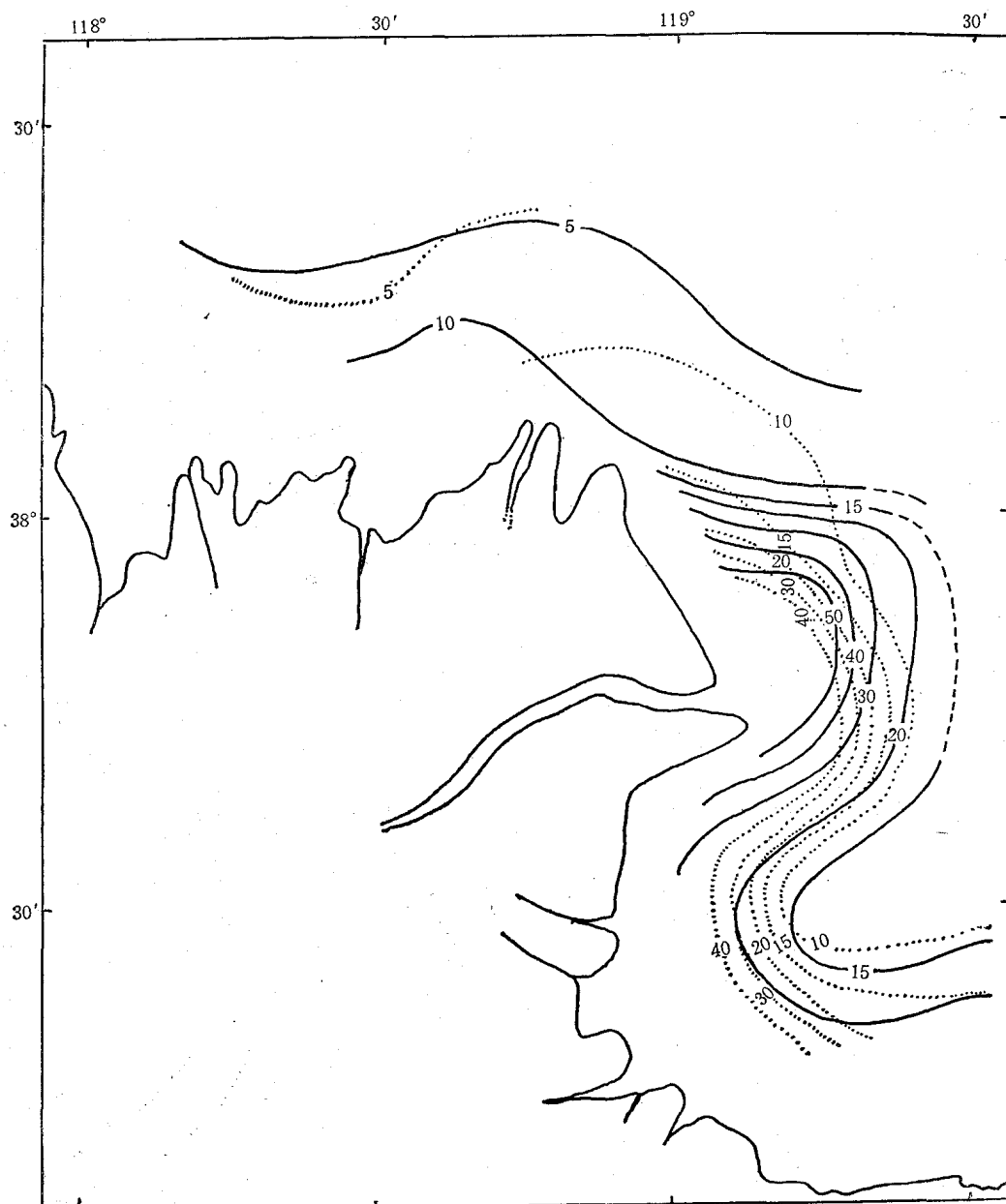


图 2f 5 月 $\Sigma\text{N}/\text{P}$ 平面分布

2. 无机氮、磷酸盐与潮汐的关系 31号站表层水 NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} 和 S 的周日变化见图 5。该站位于黄河口附近, 受黄河水的影响较大, NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} 浓度与 S 值呈负相关关系。特别是 NO_3^- 比较显著, 高潮时 (0300, 1500) S 值最大, NO_3^- 浓度最低(分别为 6.8, 7.2); 最低潮时 (2000), NO_3^- 达到全天最高浓度 (36)。

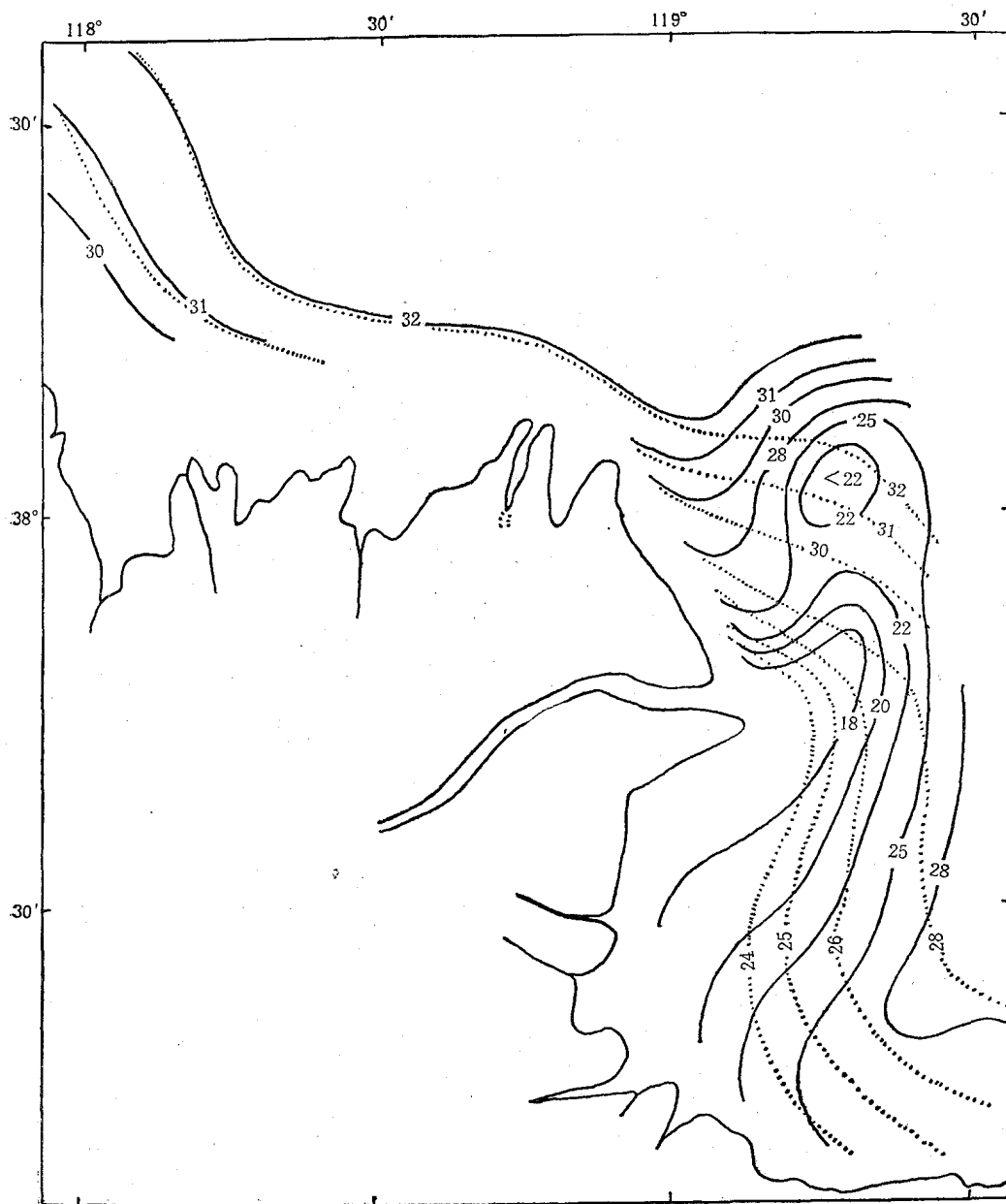


图 3a 8 月 S 平面分布

NO_3^- 与 S 之间有如下关系 ($S = 22.4-25.6$):

$$\text{NO}_3^- = 205 - 7.69S \quad (r = -0.753, n = 26)$$

NO_3^- 和 S 的关系及图 5 表明, 31 号站无机氮和磷酸盐浓度主要由海水稀释所控制, 是黄河淡水和海水混合的结果, 但从该站 PTP 总生物量较大 (129×10^4 个细胞/ m^3) 来看, 它

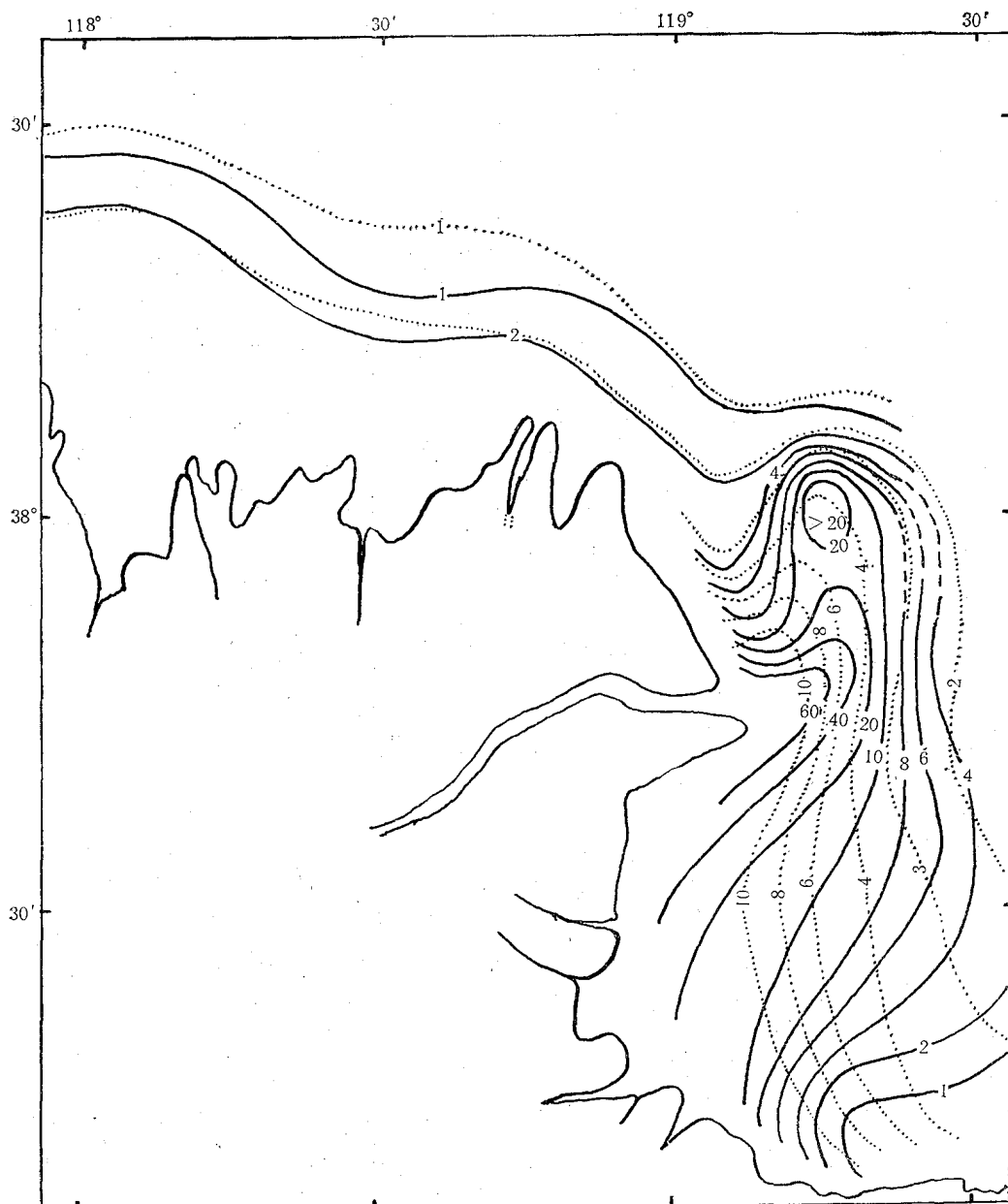


图 3b 8 月 NO_3^- 平面分布

们可能还受到浮游植物的影响。

3. 无机氮和磷酸盐的时间变化及其与 PTP 的关系 图 6a 示出黄河口区表层水中 NO_3^- 及 PO_4^{3-} 在 4—11 月间的变化, 表明该区 NO_3^- 及 PO_4^{3-} 的浓度与黄河水流量及浮游植物(根据同步调查资料)均有较大的关系。4—6 月黄河流量 (Q) 较小, 影响不明

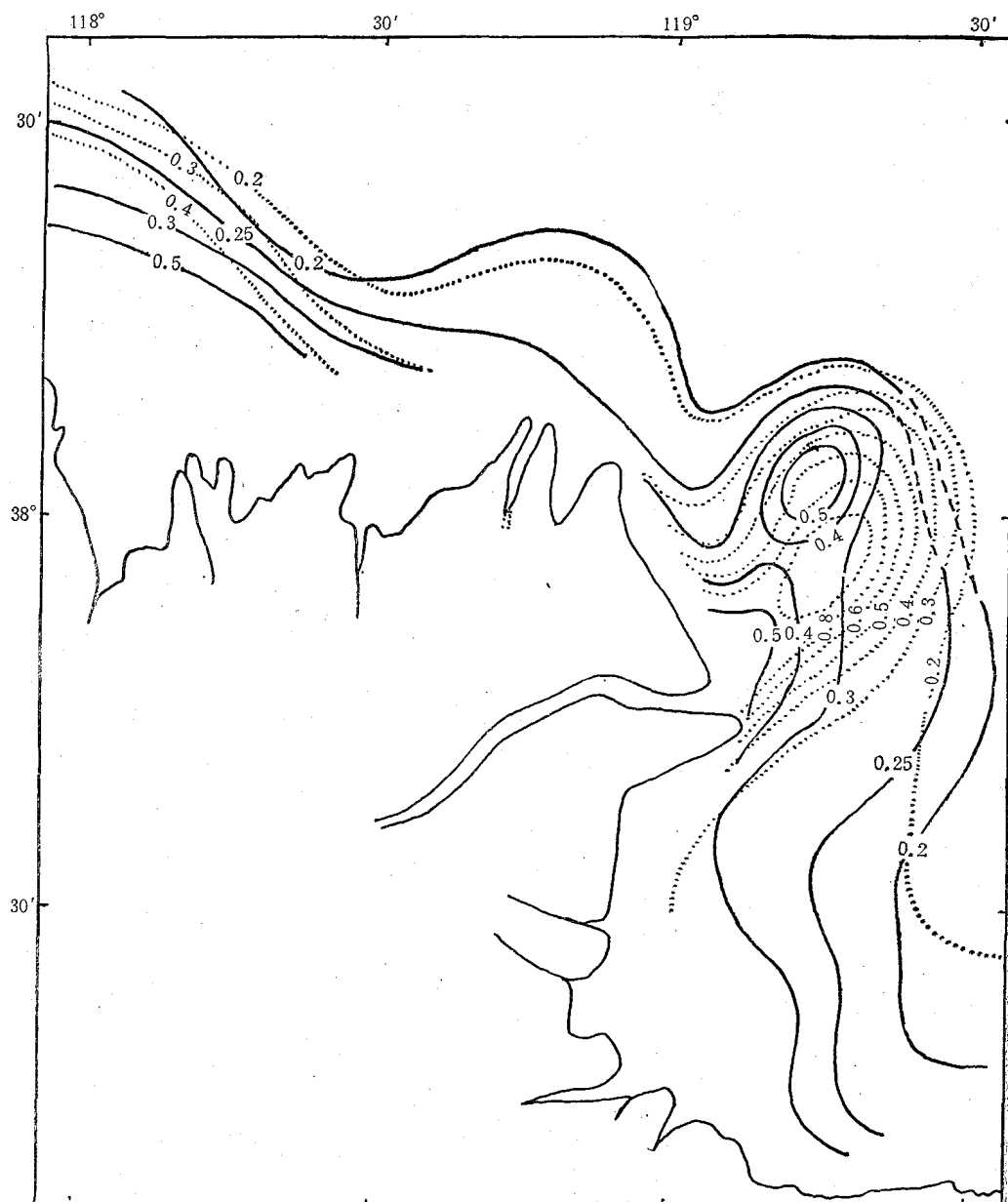


图 3c 8 月 NO_2^- 平面分布

显, NO_3^- 与 PTP 呈负相关关系, 5 月 PTP 出现小高峰, NO_3^- 浓度降低。7—10 月为黄河丰水期, 尽管 7, 9 月 PTP 量很高(分别为 551 和 718×10^4 个细胞/ m^3), NO_3^- 除满足 PTP 需要外仍然有很高量值, 其中以 8 月浓度为最高, 这是由于此时黄河流量最大而 PTP 量较低, PTP 量低可能与该月黄河口区海水透明度降低有关。10 月以后黄河

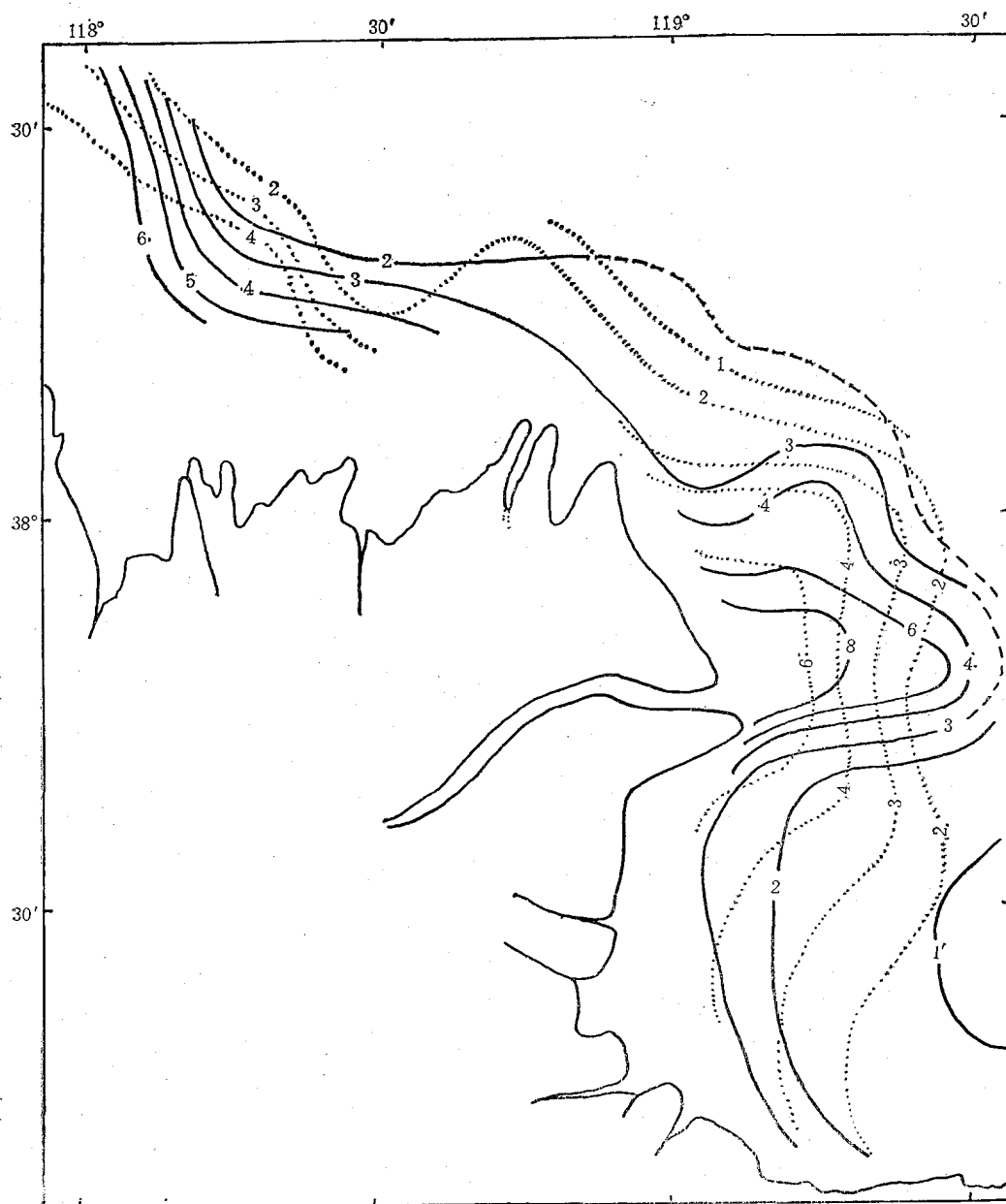


图 3d 8 月 NH_4^+ 平面分布

径流量急剧下降, PTP 量也趋减少, NO_3^- 含量达到调查期的最大值。 PO_4^{3-} 的变化及其与 PTP, Q 的关系与 NO_3^- 略有不同, 6 月份 PTP 降至很低而 PO_4^{3-} 浓度达最高值; 9 月份 PTP 达最高值而 PO_4^{3-} 浓度减少至最低值; 以后月份 PO_4^{3-} 浓度随 PTP 量的降低而逐增。

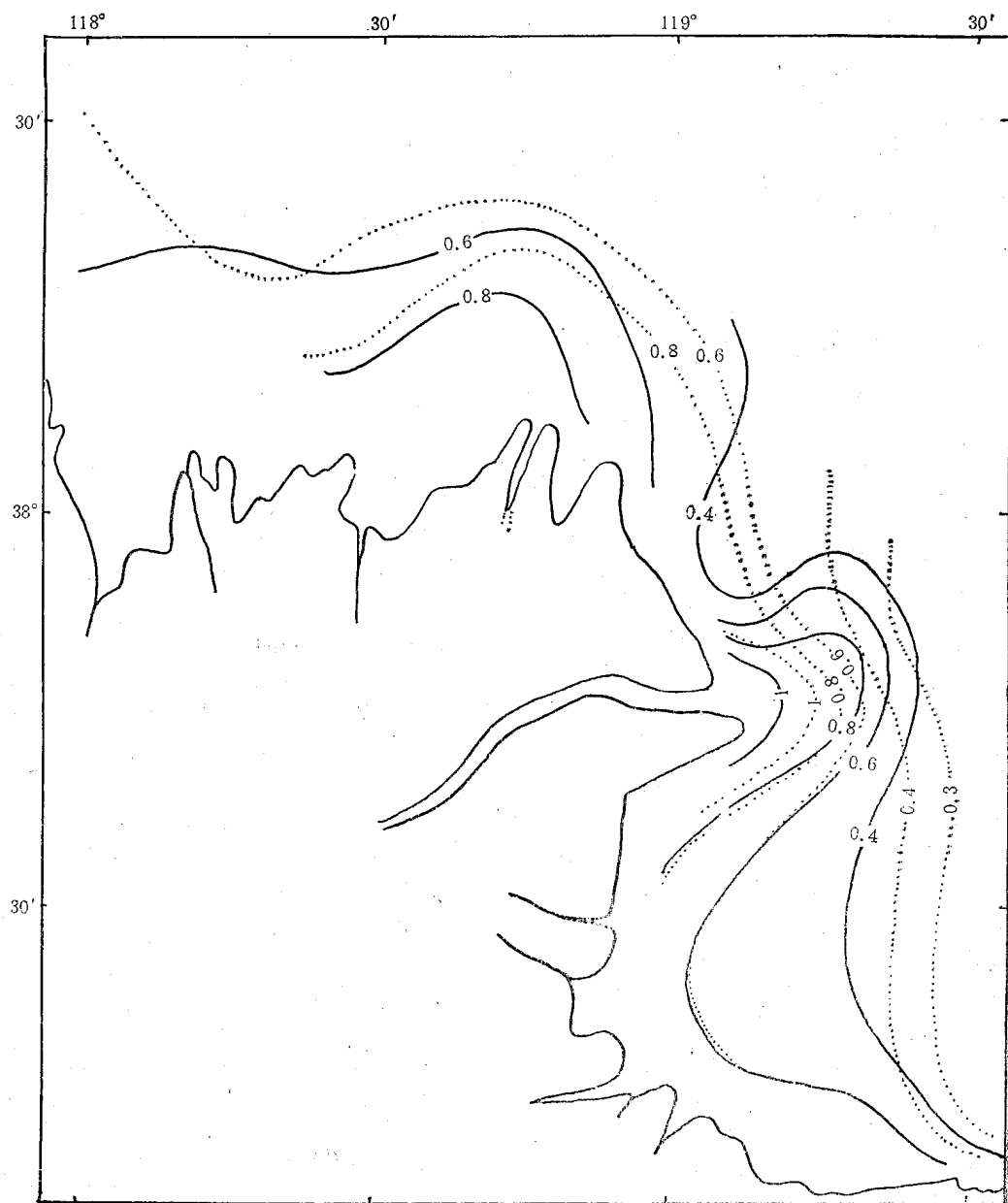


图 3c 8 月 PO_4^{3-} 平面分布

图 6b 是西北部海区 ΣN , PO_4^{3-} 在 4—11 月间的变化。(本区 NO_3^- 浓度很低, 故用 ΣN 代替) 该区因受黄河水影响很小, ΣN 和 PTP 呈负相关关系。5 月 PTP 繁殖期间 ΣN 浓度很快减少; 6—8 月 PTP 处于低值期, ΣN 浓度上升; 9—10 月 PTP 达到高峰时, ΣN 量值又下降; 以后月份随着 PTP 下降, ΣN 浓度迅速上升。与黄河口区相似, PO_4^{3-}

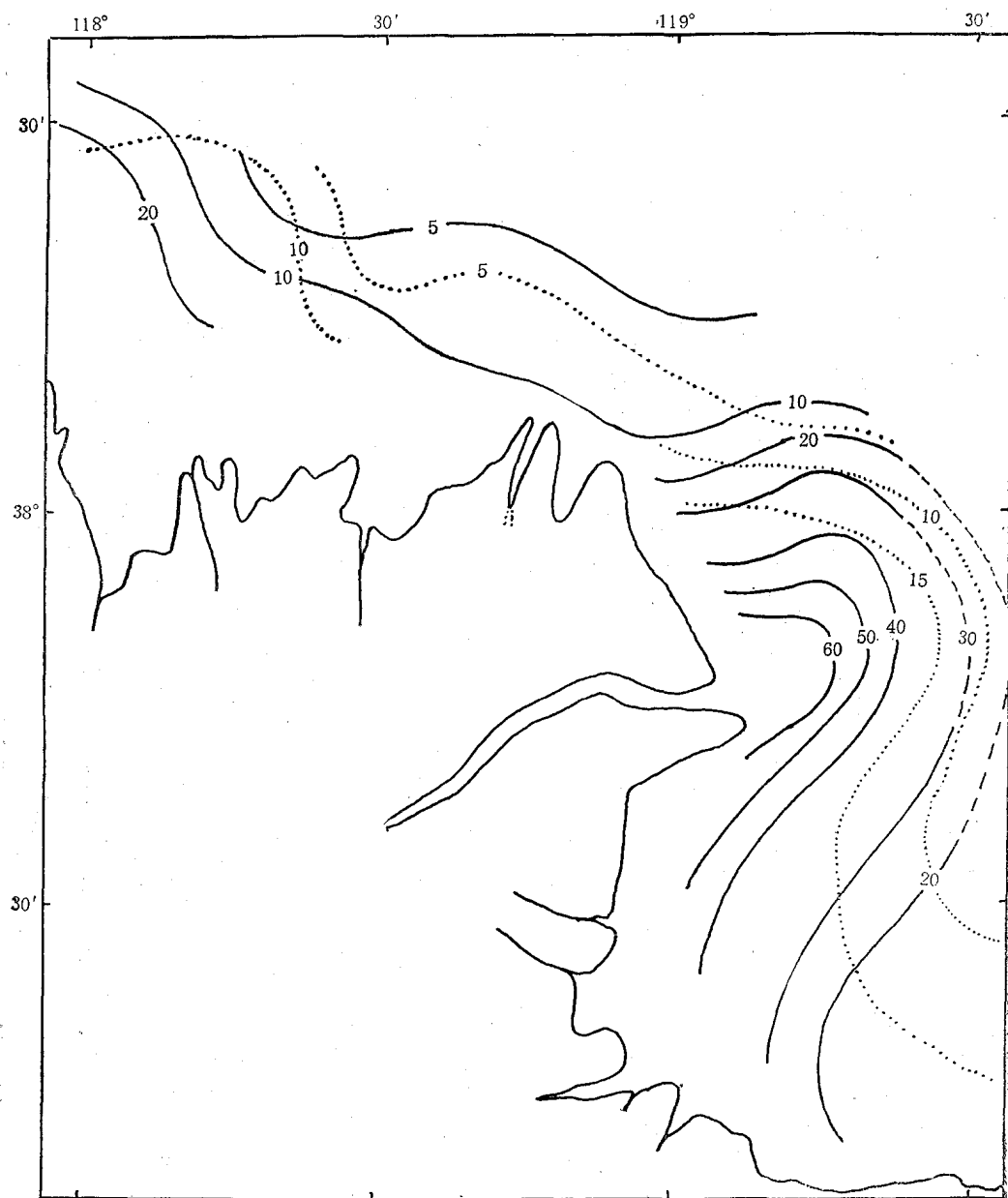


图 3f 8 月 $\Sigma N/P$ 平面分布

与 PTP 的关系不像 ΣN 那样规律, 4—8 月 PO_4^{3-} 浓度变化不大, 在 0.45—0.60 之间; 9 月下降至最低值; 之后又迅速上升。 PO_4^{3-} 的这种变化除 PTP 的一定影响外, 可能还与底质释放有关。冬季, 由于有机质大量分解积累, 是无机氮和磷酸盐最丰富的时期。

4. 河口区无机氮和磷酸盐的转移 作者对 4—11 月黄河口区无机氮、磷酸盐与盐

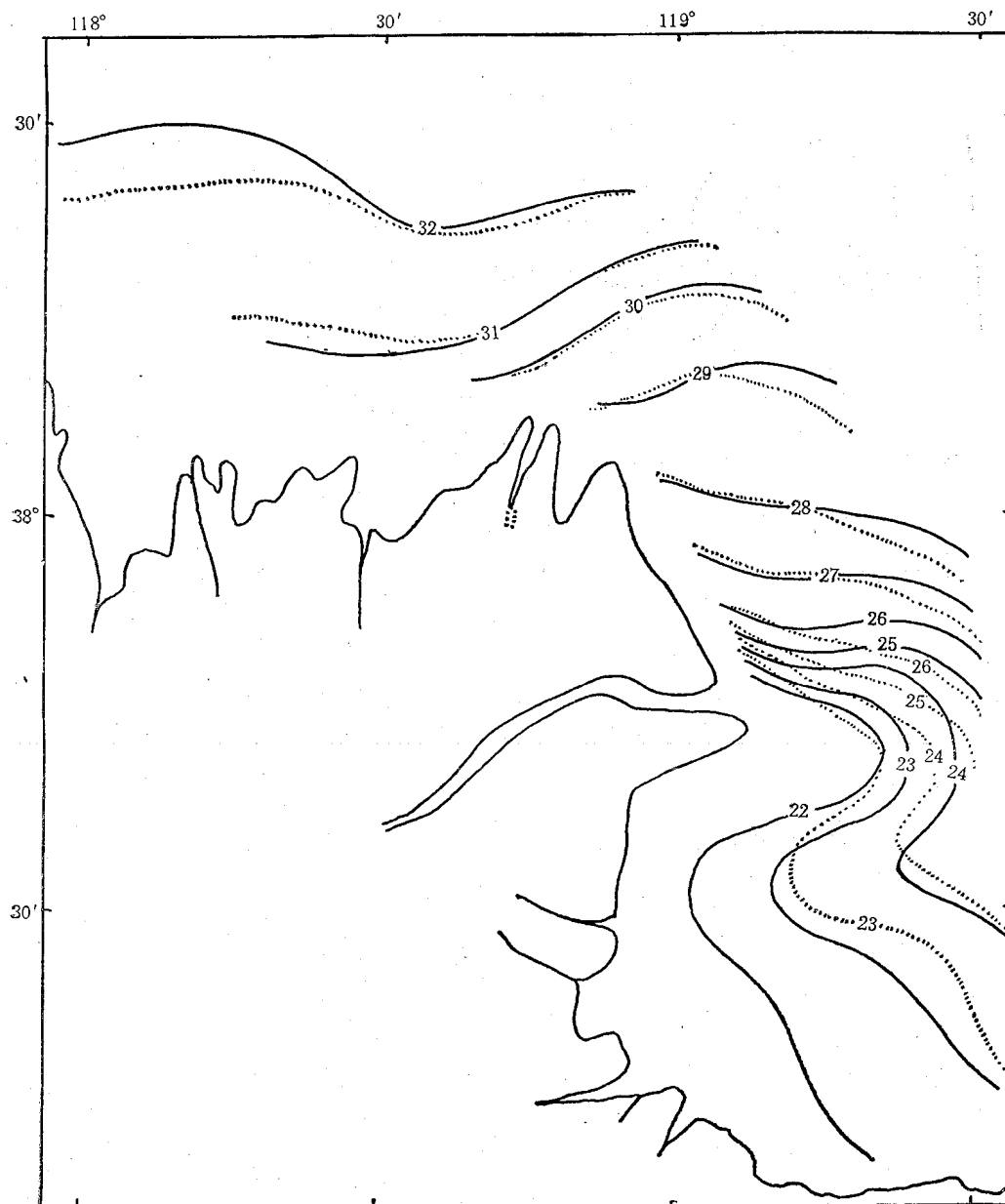


图 4a 11 月 S 平面分布

度进行了相关计算,其相关系数列于表 2,表明它们大部分具有线性负相关关系。 ΣN 与 S 的相关关系仅作了 5, 8, 11 三个月的统计。统计表明, $NO_3^- - S$ 和 $\Sigma N - S$ 都有显著相关性 (置信水平 99% 以上)。 $NO_2^- - S$ 在 4—7 和 11 月有显著相关性 (置信水平 99% 以上)。 $NH_4^+ - S$ 在调查期间无相关性或相关性很差。4, 5, 8 和 10 月, $PO_4^{3-} - S$ 有显著相

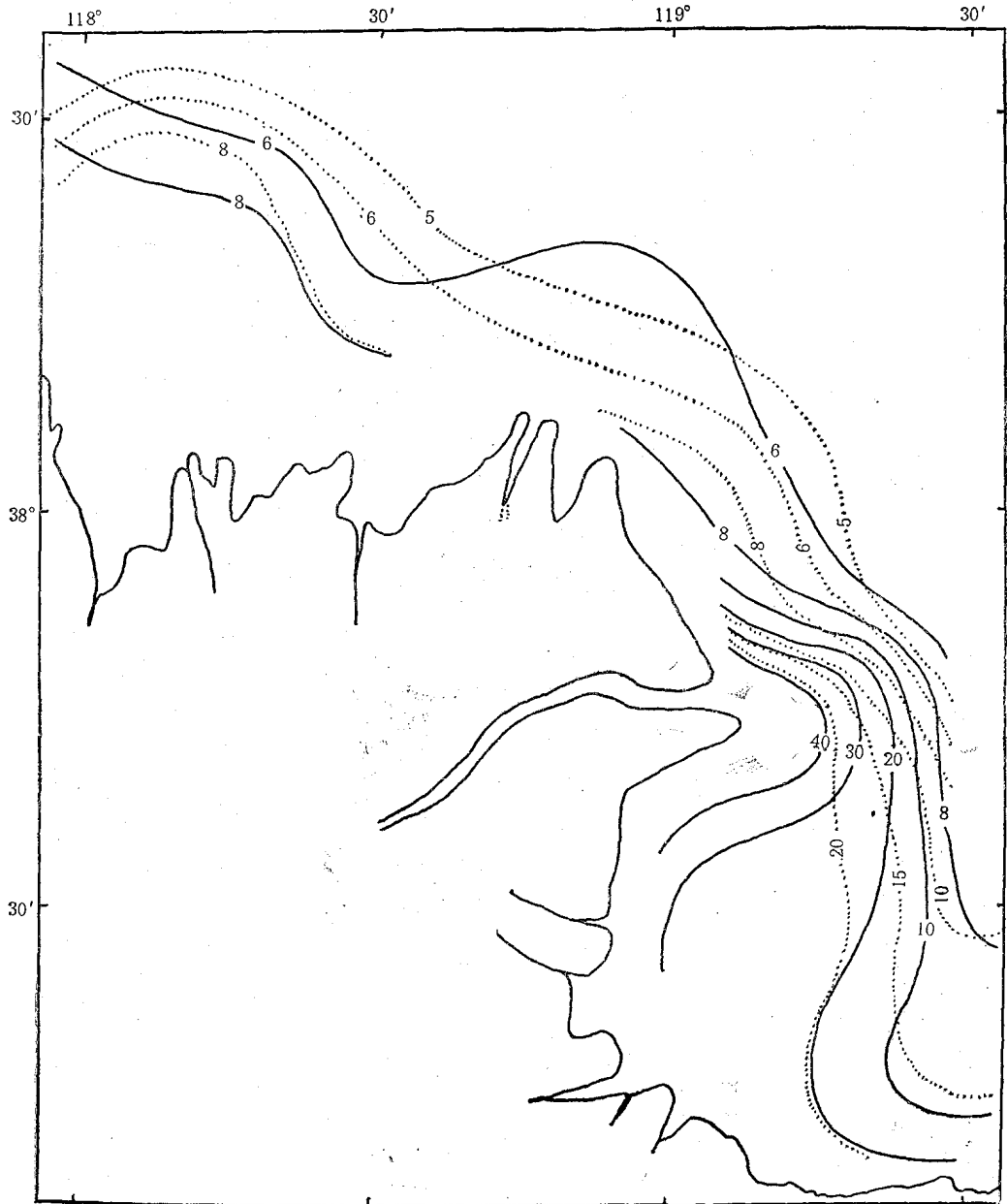


图 4b 11 月 NO_3^- 平面分布

关性(置信水平 99% 以上)。

从表 2 可以看出,在所观测的 S 范围内, NO_3^- - S 之间的线性关系在一定程度上反映了 NO_3^- 从河口向海洋迁移过程中的物理混合作用,其浓度由海水稀释所控制,尤其在 4 月(浮游植物量小)和 8 月(黄河流量最大)较为明显。但是黄河口区 PTP 量较大,一部

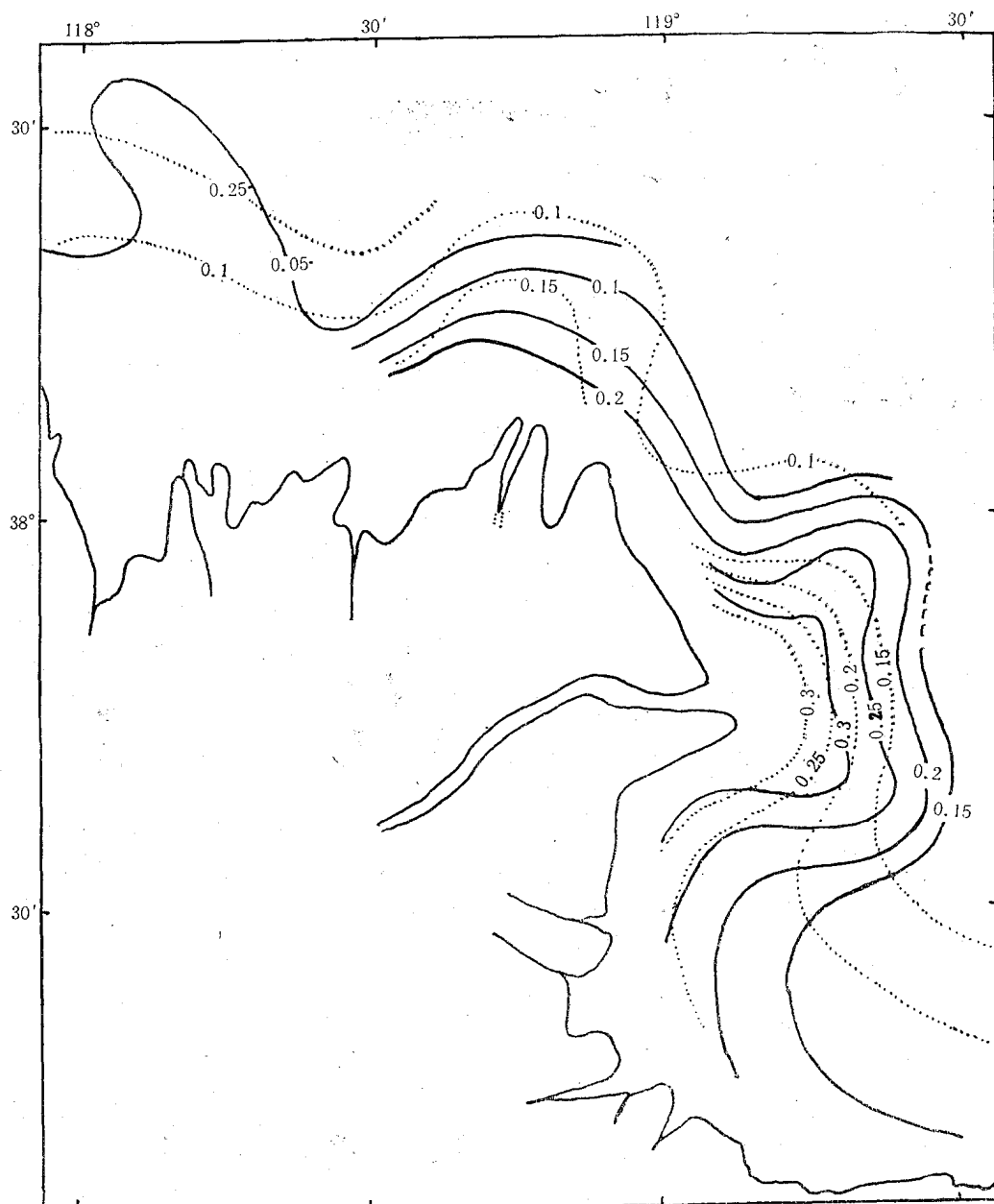


图 4c 11 月 NO_3^- 平面分布

分 NO_3^- 因浮游植物的摄取而发生生物转移, 底层则由于有机物分解而释放 NO_3^- 。以 8 月份为例(图 7a), 若以西双河渡口处的 NO_3^- 浓度为河口浓度作一条理论稀释线, 则可以发现许多点(主要是表层水)位于该线下方, 并且有的点偏离稀释线较大, 这表明 NO_3^- 有转移行为, 其它月份大致也出现这种现象。

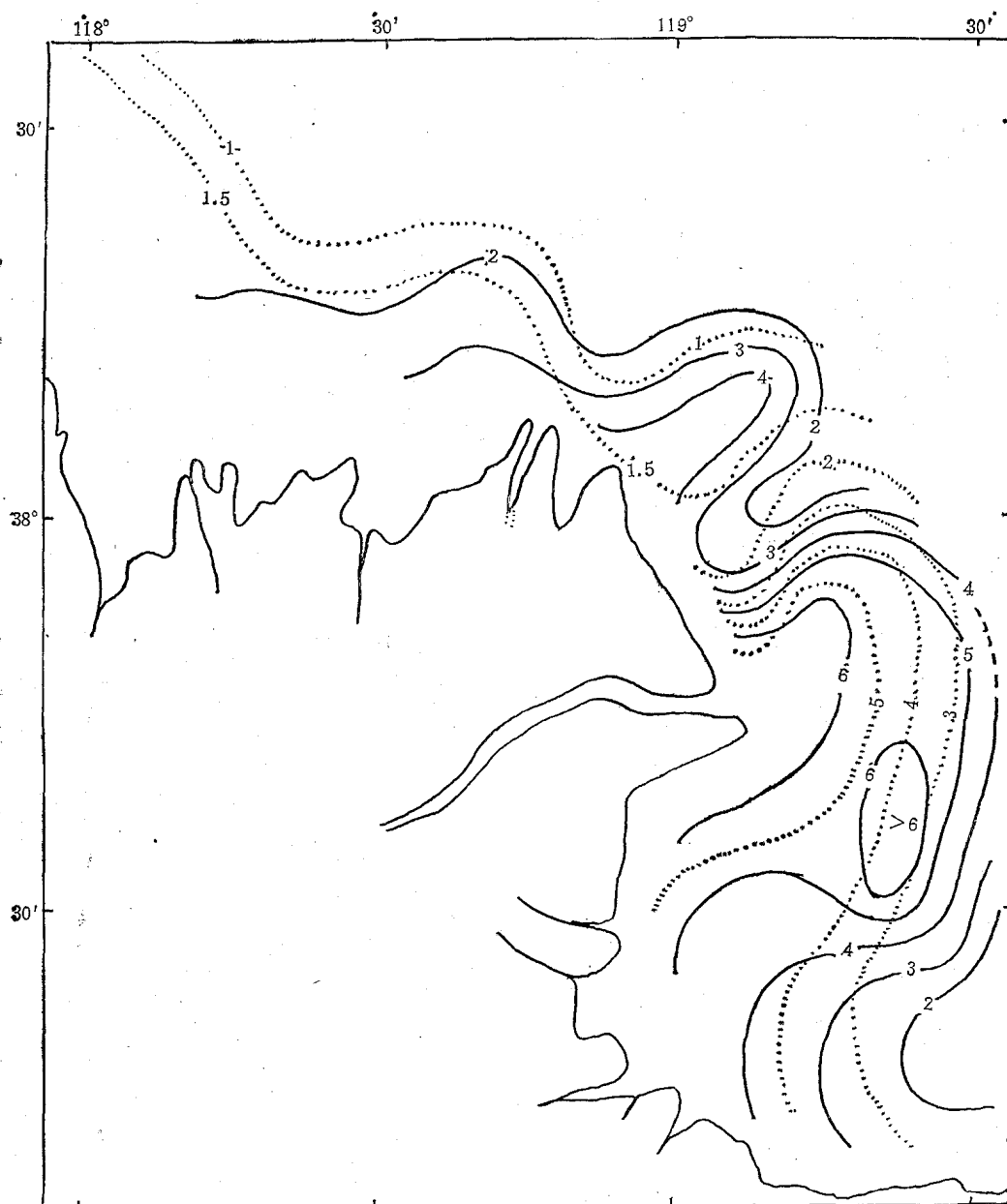


图 4d 11 月 NH_4^+ 平面分布

$\text{PO}_4^{3-}\text{-S}$ 的相关性比 $\text{NO}_3^-\text{-S}$ 差,在某些月份无相关性或相关性很差,这可能是生物活动起了很大作用,如7,9月为 PTP 高峰期, $\text{PO}_4^{3-}\text{-S}$ 相关性就很差;此外,可能还存在着其它转移过程。河口悬浮体和沉积物作为水中 PO_4^{3-} 的一种缓冲物已被许多人所研究,黄河每年向渤海输沙约 $11-12 \times 10^8 \text{t}$,是长江的2倍多,泥沙从磷浓度高的淡水中吸

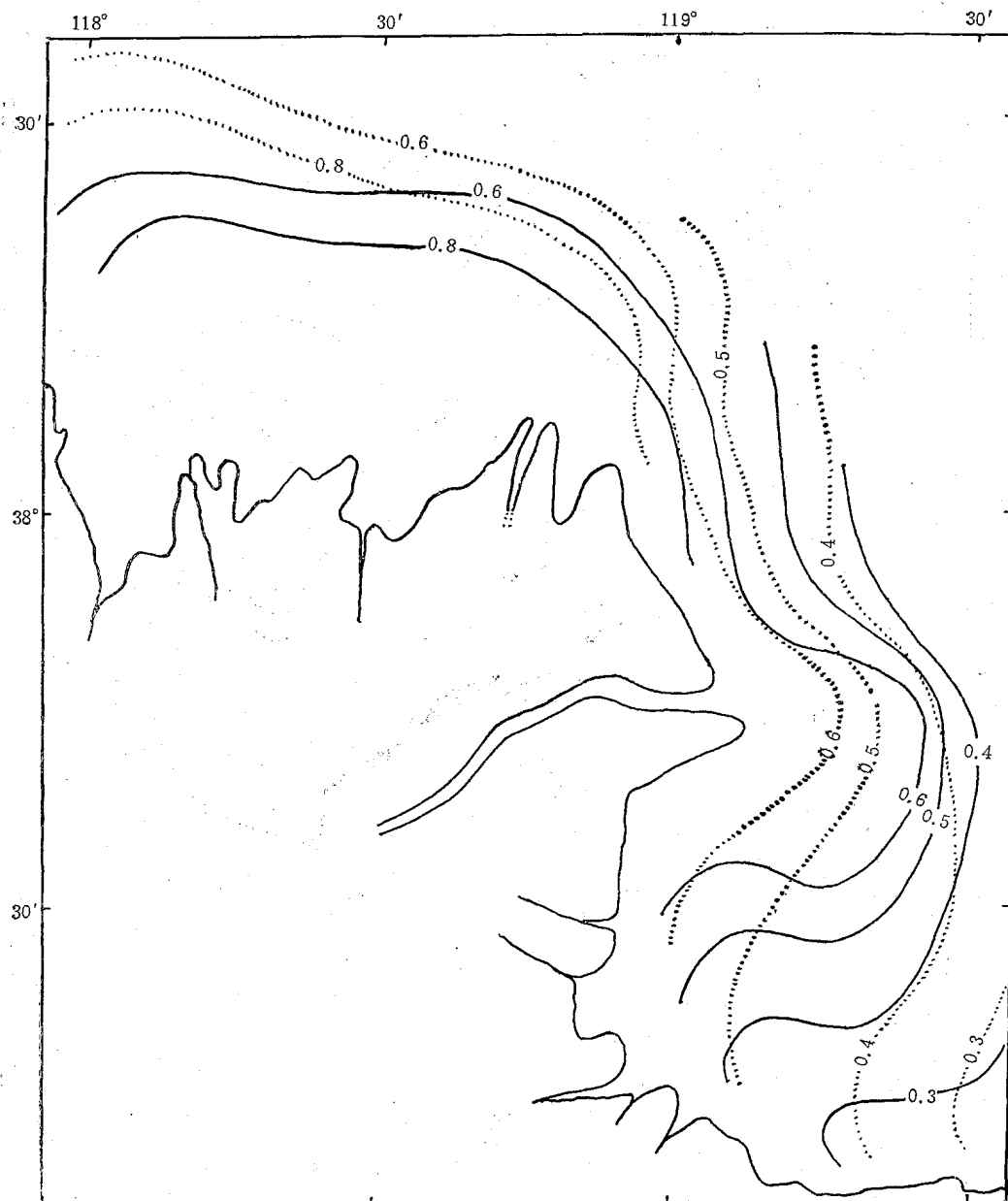


图 4c 11 月 PO_4^{3-} 平面分布

附 PO_4^{3-} ，而在含磷量较低的半咸水区又将之释放回水中 (Carritt et al., 1954; Pomeroy et al., 1965; Butler et al., 1972)。此外，在水浅的黄河口区，风力特别是潮汐作用使一部分沉积物容易再悬浮，加速了水和沉积物之间 PO_4^{3-} 的交换[特别是黄河口附近的淤泥底质 (叶青超, 1985) 有利于该作用的进行]。 PO_4^{3-} 的这种交换有助于其在水中的含量维

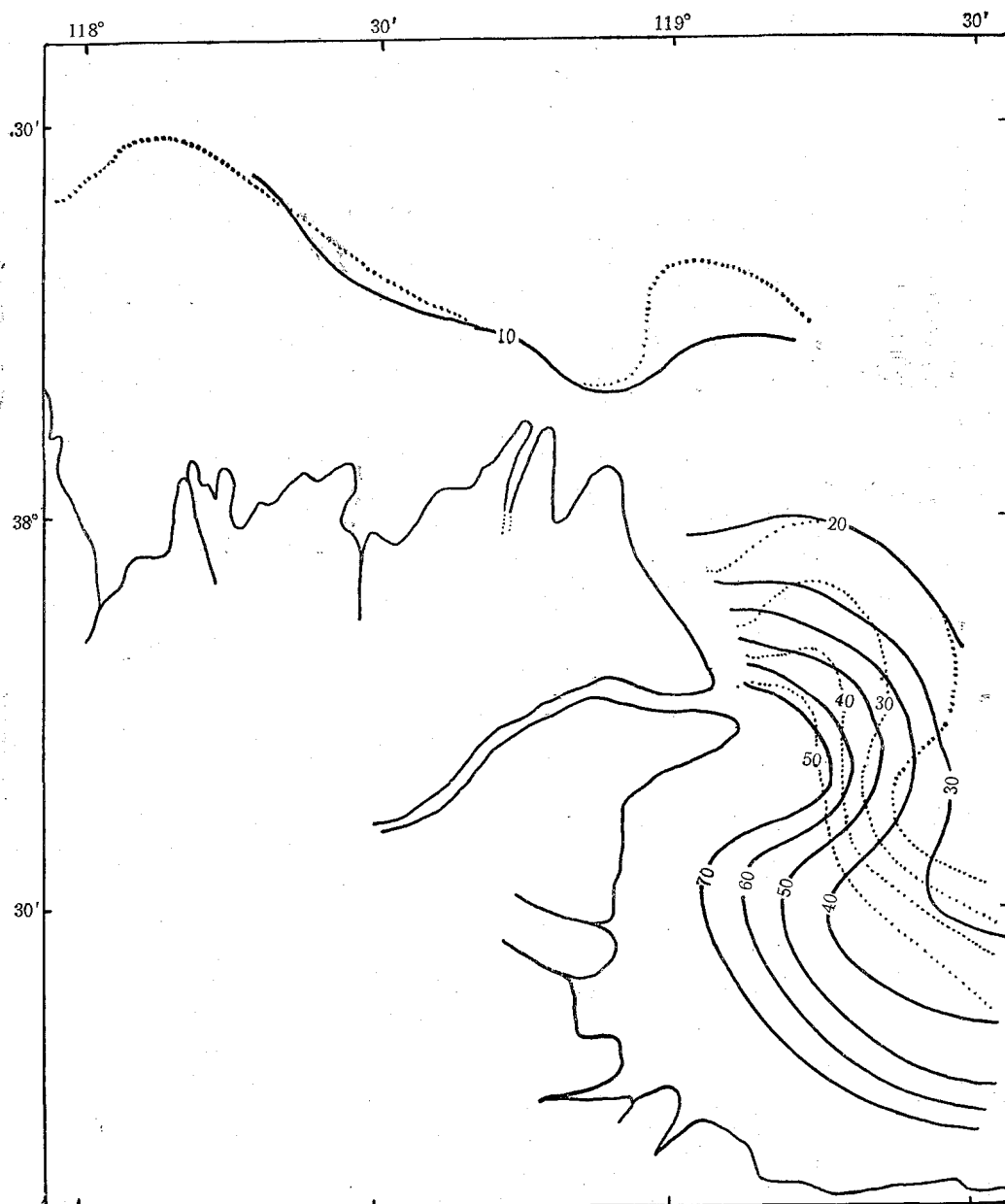


图 4f 11 月 $\Sigma\text{N}/\text{P}$ 平面分布

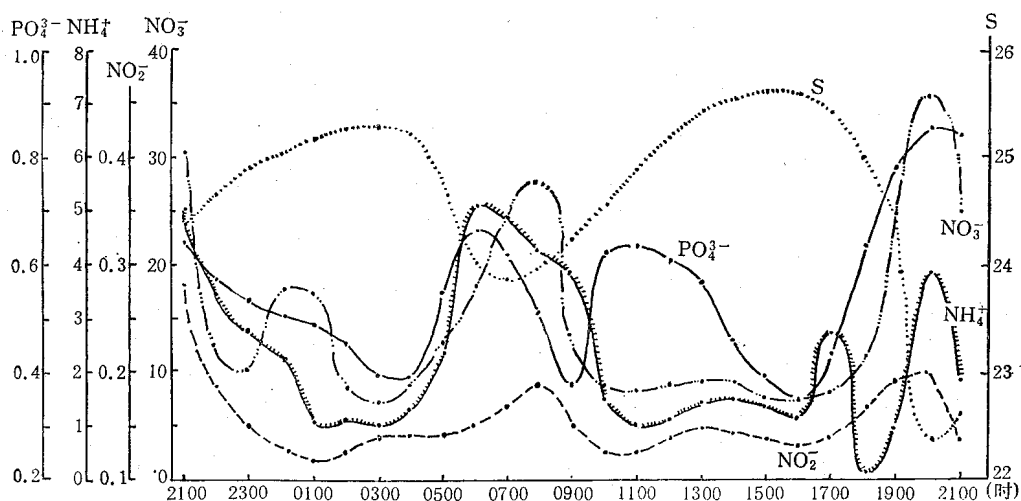


图 5 31 号站 NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , S 周日变化 (1984 年 11 月 28—29 日)

持一定的水平,从而有利于 PTP 的繁殖。比较明显的是 11 月(见图 7b),60 个数据 (0m, 10m 和底层)中除少数几个点外,在 $S = 13-29$ 范围内, PO_4^{3-} 浓度在 0.3—0.7 之间(河水是 0.6),变化较小,这可能反映了悬浮体和沉积物在 PO_4^{3-} 转移中所起的平衡作用。所以,黄河口区 PO_4^{3-} 的迁移,除了物理混合过程外,既存在生物活动的较大影响,又有其他转移的可能。

5. 黄河水中无机氮和磷酸盐与流量的关系 黄河流量及其水中无机氮、磷酸盐的季节变化见图 8a, NO_3^- , NO_2^- 与 Q 呈负相关关系。夏秋丰水期, NO_3^- 与 NO_2^- 浓度低,最低分别为 75 和 0.19; 枯水期此二态氮浓度高,最高分别为 182 及 1.2,而以 NO_3^- 变化为甚。 NO_3^- - Q , NO_2^- - Q 及 ΣN - Q 的相关方程如下:

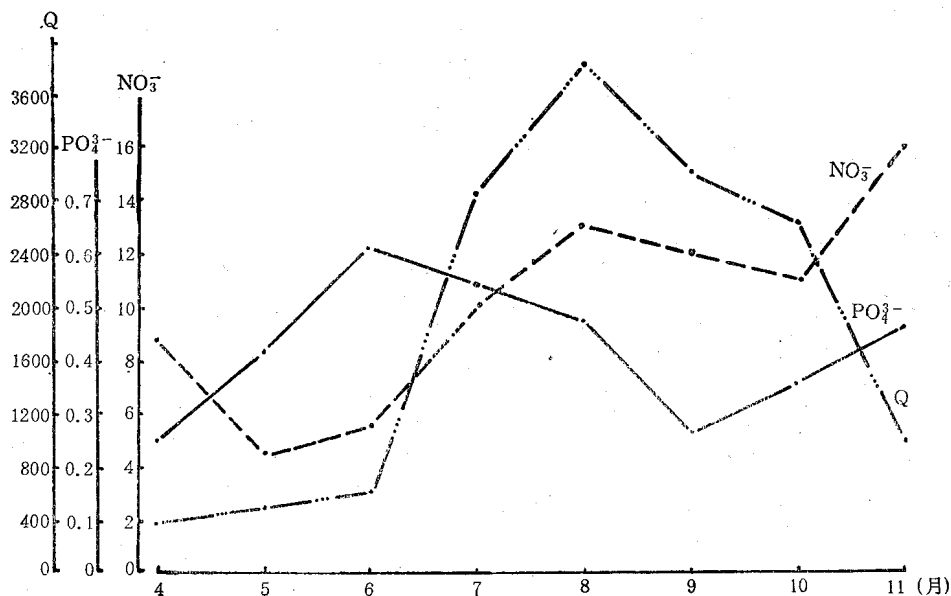
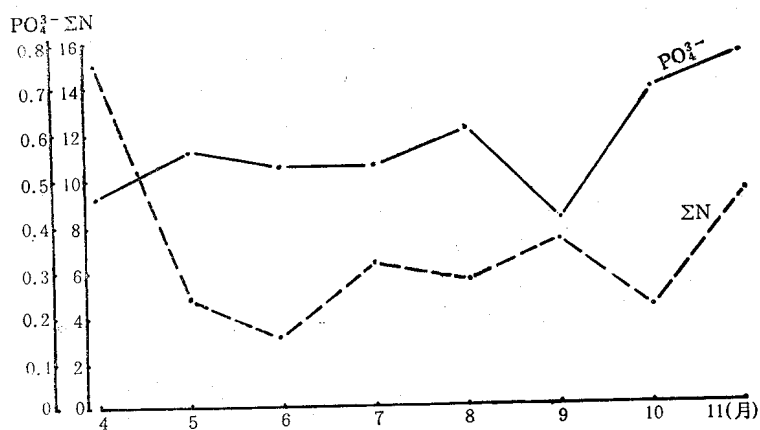
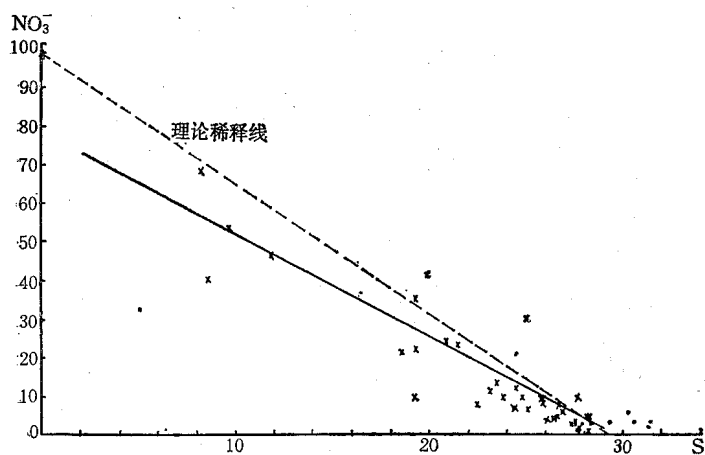
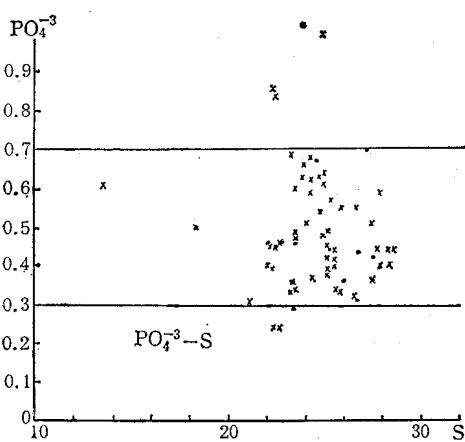


图 6a 黄河口区 NO_3^- , PO_4^{3-} 4—11 月间的变化及其与 Q 的关系

图 6b 西北部海区 ΣN , PO_4^{3-} 4—11 月间的变化图 7a 黄河口区 NO_3^- -S 关系 (1984 年 8 月)图 7b 黄河口区 PO_4^{3-} -S 关系 (1984 年 11 月)

注: × 表层, ● 10m 层、底层

表 2 无机氮、磷酸盐与盐度的相关系数

时间 (月)	水层	S 范围	NO ₃ ⁻ -S		NO ₂ ⁻ -S		ΣN-S		PO ₄ ³⁻ -S	
			r	n	r	n	r	n	r	n
4	表	0—30	-0.973	18	-0.847	18			-0.892	16
5	表、底	13—30	-0.928	36	-0.639	36	-0.812	36	-0.810	36
6	表、底	25—32	-0.676	48	-0.774	48			-0.080	48
7	表	21—28	-0.751	29	-0.523	29			-0.335	29
8	表、底	2—31	-0.923	54	-0.086	54	-0.919	54	-0.846	54
9	表	16—31	-0.913	16	0.207	16			-0.369	16
10	表	19—31	-0.799	16	0.096	16			-0.619	16
11	表、底	13—30	-0.882	60	-0.387	60	-0.848	60	-0.142	60

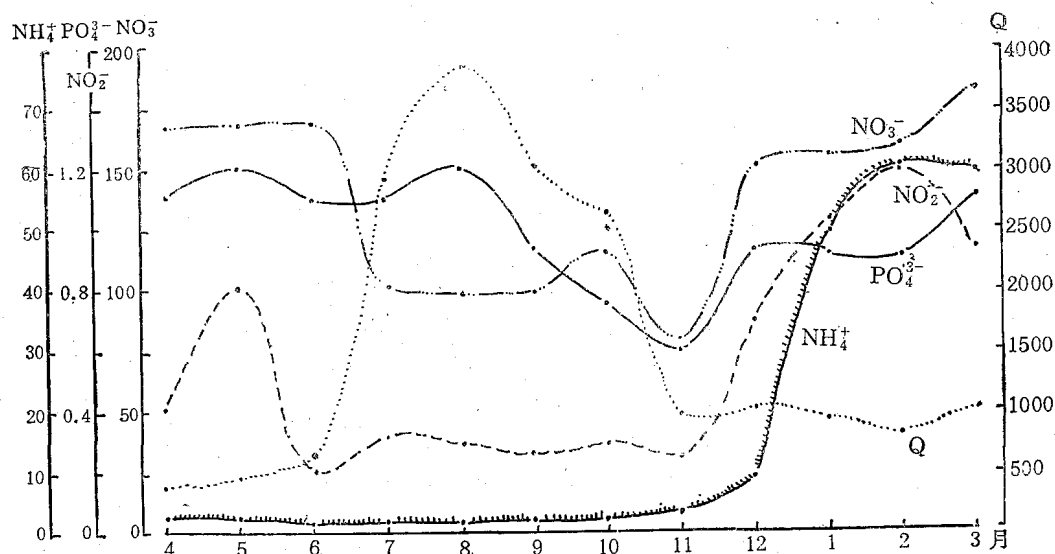
$$\text{NO}_3^- = 169 - 0.021Q \quad (r = -0.705, n = 11)$$

$$\text{NO}_2^- = 0.72 - 0.00013Q \quad (r = -0.469, n = 11)$$

$$\Sigma N = 191 - 0.027Q \quad (r = -0.630, n = 11)$$

NO₃⁻-Q 的关系见图 8b, 除个别点(11 月份)外, 两者具有良好的负相关关系, 表明黄河水中 NO₃⁻ 浓度主要由流量所控制。NH₄⁺ 在 4—11 月浓度均很低(1.0—2.7), 冬季急剧上升, 达全年最高值(61)。PO₄³⁻ 年平均浓度为 0.99, 除少数月份较低外, 一般变化较小(0.90—1.2)。总的看来, 从丰水过渡到枯水的 11 月份, 黄河水中各种无机氮和磷酸盐的浓度均降至全年最低值, 而冬季则各种无机氮浓度最高。

表 3 是本次调查结果和历史资料的对比, 表明近期黄河水中无机氮和磷酸盐浓度有较大增加, (NO₃⁻ + NO₂⁻) 其年平均浓度是 1958 年(流量较大)的 1.55 倍(同期比较为 1.14 倍), PO₄³⁻ 是 1959 年(流量较小)的 1.65 倍(同期比较为 2 倍), 这可能与我国近 20 多年来化肥的生产、使用成倍增长有关。

图 8a 黄河水无机氮, PO₄³⁻ 和 Q 的季节变化

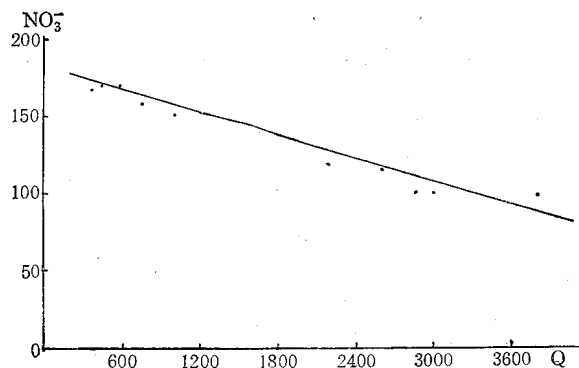
图 8b 黄河水 NO_3^- - Q 关系

表 3 黄河水无机氮和磷酸盐浓度

参数 \ 时间	1958 年	1959 年	1984 年 4 月—1985 年 3 月
Q	1919	958	1505
$(\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-)$	87*		135
PO_4^{3-}		0.60**	0.99

* 黄河河务委员会资料, 7—9 月平均值。

** 黄河河务委员会前左水文站 1959 年 5 月 2 日河床中心三个测站的平均观测值。

黄河水中无机氮浓度比长江和珠江高得多, PO_4^{3-} 也略高于长江。(表 4) 黄河和长江、珠江不同, 其中, 上游流域大工业城市较少, 下游由于长期泥沙淤积, 河床一般要高出坝外数米, 因此河水受人为污染较小。黄河中游夏季雨量集中, 暴雨把大量黄土带入黄河 (占整个黄河输沙量的 90% 以上), 导致河水中的营养盐浓度很高。虽然长江流域的化肥产量远高于黄河流域的产量 (沈志良等, 1987), 工业和生活污物的排放也更严重, 但由于黄河流域水土流失量比长江大得多, 长江径流量又远远大于黄河 (相当于黄河的 20 倍), 所以, 黄河水中无机氮和磷酸盐的浓度高于长江。

表 4 黄河、长江及珠江水中无机氮和磷酸盐浓度

河 流	采样时间	NO_3^-	NO_2^-	NH_4^+	PO_4^{3-}
黄 河	1984.4—1985.3	134	0.51	13	0.99
长 江 (沈志良等, 1987)	1983.10	42	0.22	2.7	0.83
珠 江 (林植青等, 1984)	1982.5	62	5.7	16	/

6. 无机氮和磷酸盐入海量 无机氮和磷酸盐经黄河入海量及其季节变化见图 9 a, 两者入海量的变化与黄河流量 (Q) 的变化非常一致。丰水期 (7—10 月) 入海量大, 8 月份最大, $\text{NO}_3\text{-N}$ 与 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的入海量分别达 5.2×10^3 和 137 kg/s ; 枯水期两者入海量均减少。相关统计表明, $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 平均入海量与 Q 之间呈较好的正相关关系 (图 9b), 其相关方程式为:

$$\text{NO}_3\text{-N}(\times 10^3 \text{kg/s}) = 0.632 + 0.0012Q(\text{m}^3/\text{s}) \quad (r = 0.969, n = 11)$$

$$\text{PO}_4\text{-P}(\text{kg/s}) = -0.0035 + 0.000033Q(\text{m}^3/\text{s}) \quad (r = 0.971, n = 11)$$

它们的关系说明, $\text{NO}_3\text{-N}$ 及 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的入海量主要取决于 Q 的大小。 $\text{NO}_2\text{-N}$ 及 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的入海量与 Q 之间的关系没有一定规律; $\text{NO}_2\text{-N}$ 以 8 月份为最大, 冬季次之; $\text{NH}_4\text{-N}$ 则是冬季入海量最大, 其他季节很小, 与其浓度变化相一致。

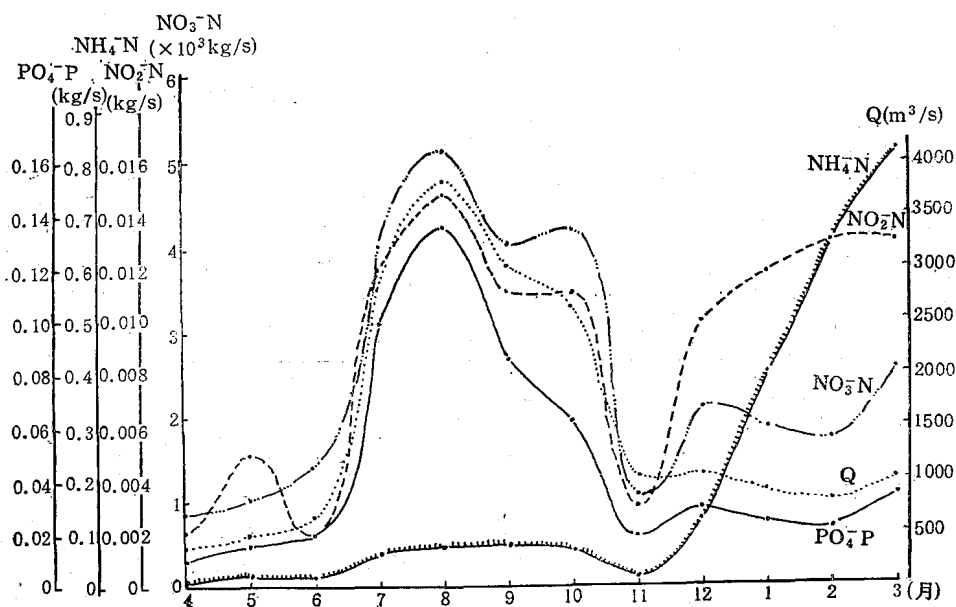


图 9a 无机氮和磷酸盐入海量季节变化

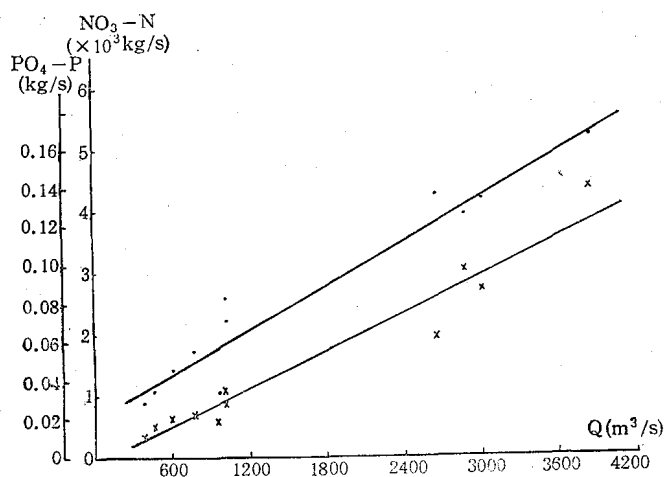


图 9b $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ 入海量与 Q 的关系

注: ● $\text{NO}_3\text{-N-Q}$
× $\text{PO}_4\text{-P-Q}$

表 5 黄河水无机氮和磷酸盐年入海量 ($\times 10^3 \text{t}$)

参数 时间	河水入海量 ($\times 10^8 \text{m}^3$)	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NO}_2\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$	ΣN	$\text{PO}_4\text{-P}$
1984.4—1985.3	468	78.2	0.28	6.1	84.5	1.45
1958	597				72.9*	
1959	298					0.56

* 为 $\text{NO}_3\text{-N}$ 与 $\text{NO}_2\text{-N}$ 之和。

从表 5 可以看出, 本次调查期间黄河水年入海总量仅是 1958 年的 78%, 而 $\text{NO}_3\text{-N}$ 与 $\text{NO}_2\text{-N}$ 两者入海总量反而增加近 5500t; $\text{PO}_4\text{-P}$ 入海量是 1959 年的 2.6 倍 (黄河水年入海量是 1959 年的 1.6 倍), 也增加很多。

7. 黄河径流量和水域生产力 渤海是我国重要的渔场, 黄河口区是多种鱼、虾、蟹、贝类的重要产卵、索饵及栖息场所。黄河年平均入海径流量为 $458 \times 10^8 \text{m}^3$, 占流入渤海的总径流量的 68%。研究表明, 黄河口区水中无机氮和磷酸盐 (特别是 NO_3^-) 的浓度远远高于渤海其它水域 (刁焕祥等, 1985), 其主要来源是黄河水。黄河水输送的大量营养盐使得黄河口附近海区具有较高的浮游生物量。根据 Vinogradov, A. P. (1938 年) 对浮游植物体进行化学分析的结果, 其体内 P 的含量为其鲜重的 0.081%; 假若本次调查计算所得黄河水 P 的年入海量全部用于浮游植物生产, 不包括其死亡-再生-再利用, 那么可生产 $179 \times 10^4 \text{t}$ 浮游植物。由此可见, 黄河水带入的营养盐对黄河口附近及渤海和黄海北部海域初级生产力的发展具有十分重要的意义。

三、结 语

1. 本次调查的大部分海区受黄河冲淡水影响, 无机氮 (特别是 NO_3^-) 浓度分布的基本趋势是河口高, 远岸低; 表层高, 底层低; 表层变化大, 底层变化小; 黄河口区浓度大, 西北部海区小。 PO_4^{3-} 表、底层浓度比较接近, 西北部海区浓度稍高于黄河口区, 其他分布趋势类似无机氮。 $\Sigma \text{N/P}$ 的分布基本上与 NO_3^- 一致, 其时间与空间变化十分悬殊。

2. 调查表明, 黄河口区有丰富的无机氮和磷酸盐, NO_3^- 是无机氮的主要存在形态, 它们均不是浮游植物繁殖的限制因素。西北部海区无机氮的主要存在形态是 NH_4^+ , NO_3^- 浓度小, 在一定时间内可能对浮游植物有限制作用。三态无机氮的分布表明, 在整个调查区水域, 各种无机氮之间的热力学平衡是难以实现的, 这与水浅和生物繁盛有关。

3. 黄河口区各种无机氮和磷酸盐在各个月份的转移过程是不同的。无机氮 (主要是 NO_3^-) 在调查期间 (在所调查的盐度范围内) 与盐度呈线性负相关关系, 反映了它在河口转移过程中的物理混合作用; 但由于浮游植物量大, 其浓度除由海水稀释外, 还受生物学转移的影响。 PO_4^{3-} 在河口的保守性比 NO_3^- 差, 这可能与悬浮体和沉积物在 PO_4^{3-} 转移过程中的缓冲作用有关。

4. 黄河水中 NO_3^- 浓度很高 (平均为 134), NO_3^- 和 NO_2^- 浓度与 Q 存在着负相关关系, 特别是 NO_3^- 。在黄河从丰水转为枯水的 11 月, 各种无机氮和磷酸盐浓度降至全年最

低值,而冬季各种无机氮浓度最高。

5. $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 入海量以 8 月为最高,分别为 5.2×10^3 和 137kg/s , 它们与黄河流流量有较好的正相关关系。这表明氮和磷的入海量主要由径流量控制。

黄河源源不断向渤海输送大量营养盐,无机氮和磷的年输入总量分别约为 $84.5 \times 10^3 \text{ t}$ 和 $1.45 \times 10^3 \text{ t}$,它是维持渤海水域较高的生物生产力的一个重要原因。

参 考 文 献

- 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。
 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,沈志良,刘兴俊,陆家平,1985。渤海无机氮的分布。海洋科学集刊 25: 53—63。
 王正方,姚龙奎,阮小正,1983。长江口营养盐 (N , P , Si) 分布与变化特征。海洋与湖沼 14(4): 324—332。
 叶青超,1982。黄河三角洲的地貌结构及发育模式。地理学报 37(4): 349—363。
 刘仲衡,吴锦秀,于永杰等,1985。利用粒度资料浅析黄河三角洲潮坪沉积环境。山东海洋学院学报 15(1): 159—168。
 吕小乔,祝陈坚,张爱斌等,1985。夏季渤海西南部及黄河口海域营养盐分布特征。山东海洋学院学报 15(1): 146—158。
 沈志良,刘兴俊,陆家平,1987。长江下游无机氮和磷酸盐分布及其在河口的转移过程。海洋科学集刊 28: 69—77。
 林植青,郑建禄,朱建华,1984。珠江中氮的迁移。海洋与湖沼 15(6): 515—520。
 顾宏堪,熊孝先,刘明星等,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。
 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。

INORGANIC NITROGEN AND PHOSPHATE IN ESTUARY OF THE HUANGHE RIVER AND ITS NEAR WATERS*

Shen Zhiliang, Liu Xingjun and Lu Jiaping

(Institute of Oceanology, Academia Sinica)

ABSTRACT

In this paper the distribution properties of NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ and PO_4^{3-} in estuary of the Huanghe River (Yellow River) and its near waters, their removal processes in estuary and their relations with phytoplankton during April to November 1984 were discussed. High concentrations of inorganic N (particularly NO_3^-) are found in the estuarine water and low concentrations in the offcoast water and in the northwest region of Huanghe River estuary, indicating clearly that the high concentration of NO_3^- is from Huanghe River water. The distribution of PO_4^{3-} in the estuary region of Huanghe River is consistent with NO_3^- , etc., but average concentration of PO_4^{3-} is higher in the water of northwest region of Huanghe River

* Contribution No. 1326 from the Institute of Oceanology, Academic Sinica.

estuary where the exchange of PO_4^{3-} is better between sediments and water. The distribution of the atomic ratio between total inorganic N and $\text{PO}_4\text{-P}$ is similar to NO_3^- and their changes of time and space is very large.

The data show that the rich inorganic N and PO_4^{3-} in the estuary region of Huanghe River are not the limiting factor for phytoplankton growth and it is possible that low concentration of NO_3^- in the northwest region of Huanghe River estuary sometimes limits the growth of phytoplankton. The distributions of three forms of inorganic N indicate that NO_3^- in the water of estuary region of Huanghe River and NH_4^+ in the water of northwest region of Huanghe River estuary are main forms of inorganic N respectively.

The relationships of inorganic N and PO_4^{3-} to salinity indicate that the removal processes of various inorganic N and PO_4^{3-} in estuary vary in different time. The negative linear relative relationship of NO_3^- to S indicates that the concentration of NO_3^- is controlled by its dilution in seawater in the range of S surveyed. At the same time, the biological removal is evident for NO_3^- because a large quantity of phytoplankton is found there. In addition to the above two factors, other way for the removal of PO_4^{3-} is possible because of the buffering action of suspensions and sediments of estuary. Therefore, the conservation of PO_4^{3-} is worse than NO_3^- .

The concentration of NO_3^- (average $134 \mu\text{mol/L}$) in the Huanghe River during April 1984 to March 1985 is much higher than that in the Changjiang River water. The relationship of the concentration of NO_3^- to the flow of Huanghe River is given below.

$$\text{NO}_3^-(\mu\text{mol/L}) = 169 - 0.021Q(\text{m}^3/\text{s}) \quad (r = -0.705, n = 11)$$

The minimum concentrations of various inorganic N and PO_4^{3-} are found in the Huanghe River in November when the flow of Huanghe River decreases. The maximum concentrations of various inorganic N are found in winter. The transports of $\text{NO}_3\text{-N}$ and $\text{PO}_4\text{-P}$ from Huanghe River into the sea are calculated to the flow of Huanghe River as indicated in the equation:

$$\text{NO}_3\text{-N}(10^3\text{kg/s}) = 0.632 + 0.0012Q(\text{m}^3/\text{s}) \quad (r = 0.969, n = 11)$$

$$\text{PO}_4\text{-P}(\text{kg/s}) = -0.0035 + 0.000033Q(\text{m}^3/\text{s}) \quad (r = 0.971, n = 11)$$

The annual transports of total inorganic N and $\text{PO}_4\text{-P}$ from Huanghe River water into sea are estimated to be 84.5×10^3 tons and 1.45×10^3 tons respectively, which accounts for the high conductivity of Bohai Sea.