

渤海湾及其东部水域的水化学要素*

沈志良

(中国科学院海洋研究所)

水化学环境是海洋生态系统中的一个重要环节,与生产力密切相关。水化学环境的研究对于开发海洋和发展海洋水域生产力有着极其重要的意义。渤海三面为陆地所围,黄河、海河、滦河等沿岸数十条河流携带大量营养物质入海,是海洋生物繁殖的物质基础。因此,渤海是许多经济鱼、虾的索饵场和产卵场,亦是我国北方的一个重要渔场。本文主要根据作者在 1983 年的调查资料对渤海湾及其东部水域的水化学要素(S , pH , NO_3-N , NO_2-N , NH_4-N 和 PO_4-P)的分布及相互关系进行讨论。

一、调查与方法

调查时间:1983 年 7 月、9 月、10 月和 11 月,调查站位见图 1。共设 37 个大面观测站。其中渤海湾 20 个站,渤海湾外东部 17 个站。

站位取样:水深小于 10m 取表、底二层水;水深大于 10m 取表层、10m 层和底层。

pH 样品在现场用电位法立即测定(用 802pH/离子计)。营养盐水样保存在聚乙烯瓶中,加数滴氯仿,在 $-25^{\circ}C$ 低温冰箱内速冻,回实验室融化后取上层清液测定。 NO_3-N 用二苯基联苯胺二磺酸钠法(刁焕祥等,1985), NO_2-N 用重氮偶氮法, NH_4-N 用次溴酸钠氧化法, PO_4-P 用磷钼蓝法测定。营养盐水样均利用美国 Technicon AA-II 型自动分析仪进行比色分析。

二、结果与讨论

(一)平面分布

7 月(夏季)和 11 月(秋季)表、底层海水中盐度(S)及 pH , NO_3-N , NO_2-N , NH_4-N 和 PO_4-P 的平面分布见图 2 和图 3。

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 3407 号。

收稿日期:1997 年 8 月 20 日。

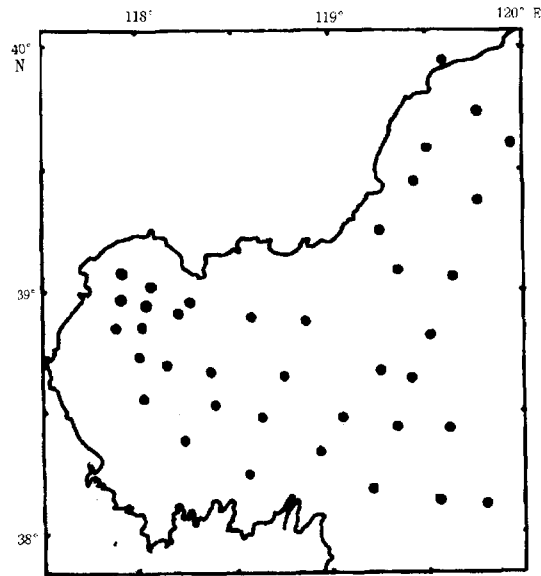


图1 站位图

1. S 的分布

7月表层水中 S 分布的特点是东部低、渤海湾高(图2a)。低 S 区在调查区东南水域($S < 32$),等 S 线自南向北密集分布,最低 S 为30.4,7月份黄河进入汛期,该区明显受到黄河冲淡水的影响;高 S 区分布在调查区的西北部, S 超过33,这表明调查期间海河并未形成明显的径流。据报道(邹景忠等,1988a),海河口区的人海径流在50年代为 $152.8 \times 10^8 \text{ m}^3$,至1983年已降低到 $2.64 \times 10^8 \text{ m}^3$,该年污水排放量占径流量的比例高达81.44%。河口区海水呈现高 S 还与该区的蒸发量有关,根据塘沽气象站的数据,1983年7月蒸发量为265.4mm,而该月的降水量仅为118.4mm,不及蒸发量的一半。底层水的 S 分布与表层基本一致。11月低 S 区也在调查区的东南部(图3a),但位置已往西移, S 值也高于7月份,这是黄河开始进入枯水期的缘故。高 S 区移至调查区西南水域,海河口 S 低于32.5。底层水 S 分布也与表层相似。

2. pH 的分布

海水中pH值的分布变化主要由二氧化碳-碳酸盐体系所控制,受到物理化学过程和生物地球化学过程等影响,特别在生物活动频繁的河口海湾地区,各种因素叠加或抵消,变化十分复杂。7月,渤海湾高pH值分布在西北部,从西北向东南方向递减,最高值为8.20(图2b);低pH值分布在渤海湾南部,并向北和向东递增,这与叶绿素a的分布趋势基本相吻合(吕培顶等,1984)。上层浮游植物的光合作用消耗海水中的游离 CO_2 ,同时释放出等量的 O_2 ,使pH值升高。7月,底层pH值分布趋势与表层相似,惟其值低于表层,底层pH值低于表层与有机物分解使pH值降低有关。对受黄河冲淡水影响水域的表、底层海水pH值和 S ($S = 30.45 - 32.52$)进行相关统计,可以发现二者呈显著的负线性相关($r = -0.550, n = 28, r_{0.01} = 0.478$),这与长江口的情况相似(山东海洋学院,1986)。11月,表、底层海水中pH值的分布特征(图3b)均是东部高于西部,中央高于近岸,且变化梯度远小于7月,反映了外海高pH值水的影响增强,调查区的pH值介于8.00—8.19之间,

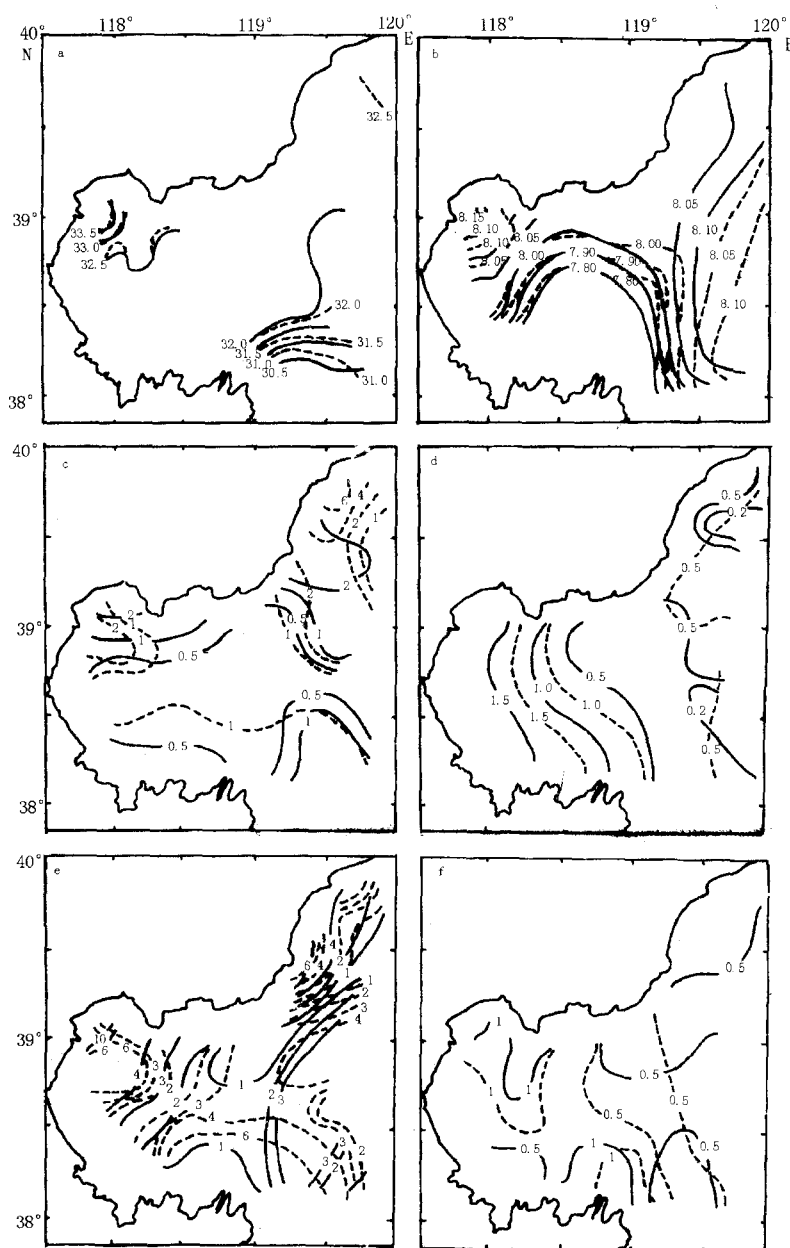


图2 7月化学要素的平面分布

—表层;--底层(下同)

a. S ; b. pH ; c. NO_3-N ($\mu\text{mol/L}$); d. NO_2-N ($\mu\text{mol/L}$); e. NH_4-N ($\mu\text{mol/L}$); f. PO_4-P ($\mu\text{mol/L}$)

明显高于7月。

3. NO_3-N 的分布

7月,表层 NO_3-N 浓度分布表现为河口近岸水域高,其他水域低(图2c),最高浓度在滦河口附近水域,为 $3.1 \mu\text{mol/L}$ 。渤海湾 NO_3-N 平均浓度($0.62 \mu\text{mol/L}$)低于调查区东部($1.4 \mu\text{mol/L}$),渤海湾中央大部分水域 NO_3-N 浓度低于 $0.5 \mu\text{mol/L}$,许多站 NO_3-N

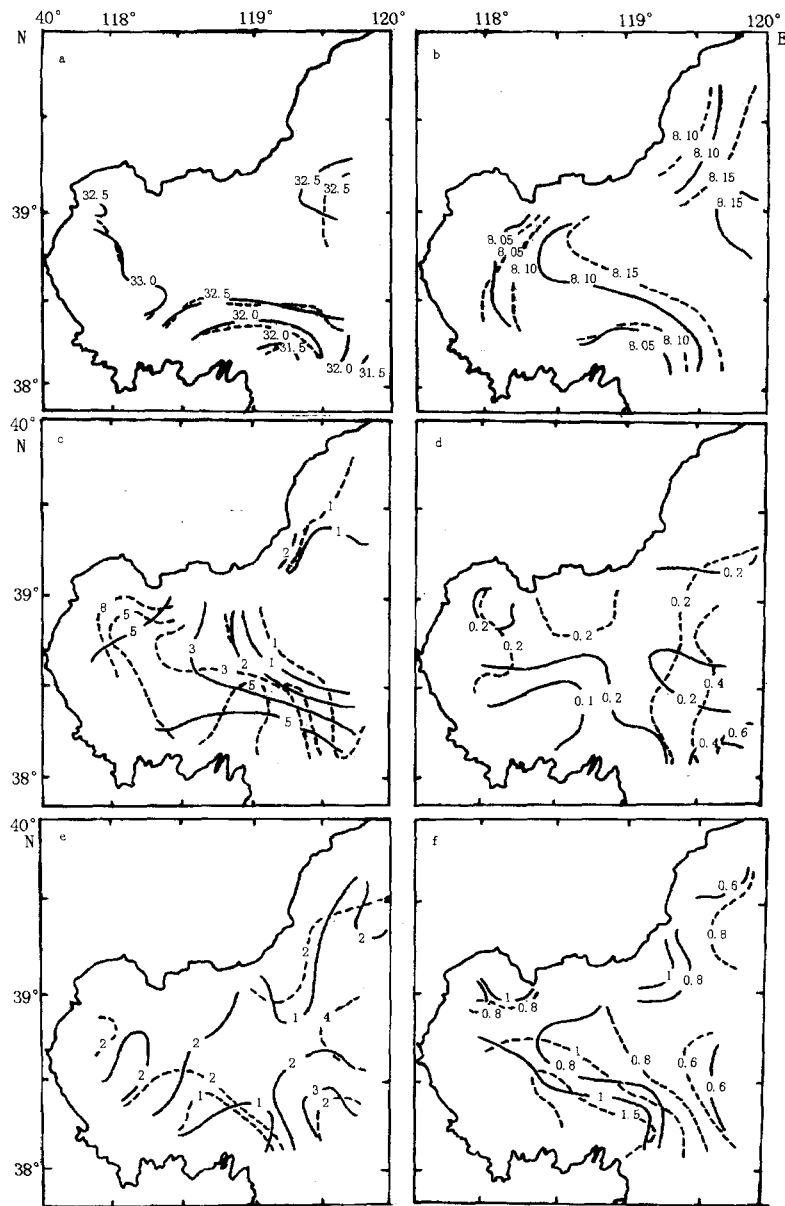


图3 11月水化学要素的平面分布

浓度在检出限以下。在底层, $\text{NO}_3\text{-N}$ 高浓度区分布在秦皇岛近岸水域, 最高值为 $7.3 \mu\text{mol/L}$, 滦河口和海河口附近水域也较高; 低浓度区也在调查区中央。11月, $\text{NO}_3\text{-N}$ 高浓度区 ($>5 \mu\text{mol/L}$) 在海河口和调查区东南部水域 (图 3c), 低浓度 ($<1 \mu\text{mol/L}$) 在调查区东部水域。底层 $\text{NO}_3\text{-N}$ 分布与表层相似。秋季 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度明显高于夏季。

4. $\text{NO}_2\text{-N}$ 的分布

7月, 表、底层 $\text{NO}_2\text{-N}$ 与表层 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度的分布类似 (图 2d), 西部浓度高, 由西向东递减。西部沿海 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度超过 $1.5 \mu\text{mol/L}$, 这显然与海河区有机污染物排放密切相

关。据报道(邹景忠等,1988b),每年排入渤海湾的工业污水为 $5.28 \times 10^8 \text{t}$,生活污水 $1.4 \times 10^8 \text{t}$,其中排入海河口区的污水量就占 95% 以上,排放量主要集中在汛期。根据天津环保局的资料,1983 年由南、北排污河排入海的 COD 总量达 $1.2 \times 10^5 \text{t}$ 。 $\text{NO}_2\text{-N}$ 是有机物降解的产物之一,也反映了有机污染的程度。11 月, $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度已大大降低,除东南部底层水稍高外,分布较均匀,一般在 $0.2 \mu\text{mol/L}$ 左右。

5. $\text{NH}_4\text{-N}$ 的分布

7 月,表层 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度以海河口区和滦河口区最高,自河口向外海方向递减,等值线密集(图 2e)。调查区中部 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度较低,有的站位在检出限以下,底层 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度分布除了上述两个高区外,调查区南部和秦皇岛近岸水域也各有一个高区。河口区 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度高是径流直接输入以及有机物分解的结果。11 月, $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度大幅度下降,表层除调查区东南部和西北部稍高外,其它水域较低(图 3e)。底层,渤海湾北部和调查区中央水域 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度较高,其余水域一般均低于 $2 \mu\text{mol/L}$ 。

6. $\text{PO}_4\text{-P}$ 分布

7 月,调查区表、底层 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度大部分在 $0.5\text{--}1.0 \mu\text{mol/L}$ 之间,大于 $1.0 \mu\text{mol/L}$ 的水域仅分布在调查区西北部和老黄河口附近(图 2f)。11 月, $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度高与夏季,大于 $1 \mu\text{mol/L}$ 的水域主要分布在渤海湾南部,底层高浓度区范围大于表层,且浓度高于表层(图 3f)。渤海湾南部 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度高与悬浮沉积物释放 $\text{PO}_4\text{-P}$ (Shen,1988)有关,该区水浅和淤泥质沉积(叶青超,1982),特别在入秋以后水体垂直对流以及风浪和潮汐等水动力作用有利于沉积物向水中释放 $\text{PO}_4\text{-P}$ 。

(二)垂直分布

7 月和 11 月水化学要素平均值的垂直分布见图 4。夏季海水温度的垂直梯度阻碍了水体上、下之间的物质交换,特别在调查区东部,有些站位表层水温高于底层 3°C 以上,盐度相差 $0.2\text{--}0.7$,因此水化学要素在垂直方向上也存在一定的梯度。表层 pH 的平均值高于 10m 层和底层,表、底层相差 0.05 ,这与表层浮游植物的光合作用和底层有机物的分解有关。三态无机 N 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度的垂直变化均是随水深而增加,这与 pH 的垂直变化是相吻合的,反映了生物地球化学过程的影响。11 月,水温垂直梯度趋于消失,水体上、下

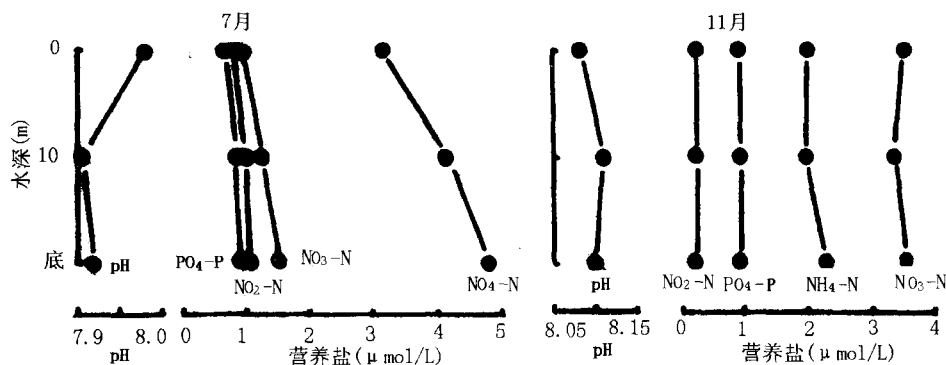


图 4 水化学要素平均值的垂直分布

对流加强,水化学诸要素垂直分布较均匀。表、底层平均 pH 值之差为 0.02; $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ 的浓度差分别为 $0.11 \mu\text{mol/L}$, $0.01 \mu\text{mol/L}$, $0.23 \mu\text{mol/L}$, $0.09 \mu\text{mol/L}$, 底层稍高于表层。

(三)水化学要素之间的关系

对 11 月调查区表层、10m 层和底层海水的全部数据进行回归分析,可以得到以下线性方程:

$$\text{NO}_3\text{-N}(\mu\text{mol/L}) = 275.895 - 33.656\text{pH} \quad (r = -0.684, n = 90)$$

$$\text{TIN}(\mu\text{mol/L}) = 256.210 - 30.920\text{pH} \quad (r = -0.530, n = 90)$$

$$\text{PO}_4\text{-P}(\mu\text{mol/L}) = 21.304 - 2.516\text{pH} \quad (r = -0.355, n = 90)$$

$$\text{NO}_3\text{-N}(\mu\text{mol/L}) = 0.607 + 2.897\text{PO}_4\text{-P}(\mu\text{mol/L}) \quad (r = 0.410, n = 90)$$

$$\text{NH}_4\text{-N}(\mu\text{mol/L}) = 1.248 + 4.375\text{NO}_2\text{-N}(\mu\text{mol/L}) \quad (r = 0.388, n = 90)$$

上述方程表明, $\text{NO}_3\text{-N}$, TIN , $\text{PO}_4\text{-P}$ 与 pH 之间呈显著的负线性相关关系,而 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 之间则呈显著的正线性相关关系($r_{0.01} = 0.271$)。营养盐与 pH 呈相反关系是由生物地球化学过程所决定的。相关系数偏低是受外源性营养盐和有机物输入(包括径流、降水、污水等)、水体运动、海洋和大气界面之间的 CO_2 交换,以及 CO_2 和碳酸盐体系之间的平衡等的影响所致。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 不是有机物分解的直接产物,因此影响了它与 pH 之间的关系; $\text{PO}_4\text{-P}$ 在水和悬浮沉积物之间的交换也影响了它和 pH 之间的关系。如果去掉河口近岸浅水水域和底质为淤泥的站位,对调查区中央水域的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 pH 进行相关统计,则可以发现二者的负相关关系更为显著($r = -0.713$, $n = 46$, $r_{0.01} = 0.369$)。 $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$ 与 pH 之间相关性很差,除了上述原因外,还由于二者不稳定,它们将进一步氧化为 $\text{NO}_3\text{-N}$ 。此外,水生动物能直接排泄 $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ 还容易吸附在多种表面上(赖利等, 1982)。11 月, $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度为调查期间最低值,可能表明二者向 $\text{NO}_3\text{-N}$ 转化较快(下面还将讨论),这从 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度较高和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 与 pH 之间的相关关系中也可以得到佐证。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 之间呈现显著的正相关,在某种程度上可能表明二者变化的一致性。尽管 $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$ 与 pH 没有直接关系,但由于三态无机 N 都能直接为浮游植物利用(赖利等, 1982),因此, TIN 与 pH 之间也呈显著负相关。

与 11 月不同,7 月调查区受沿海诸多河流的影响较大(丰水期)。根据作者的调查, 1984 年 7 月,黄河向黄河口区输送的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 通量分别为 $1.04 \times 10^4 \text{t}$ 和 260t (该月入海径流量为 $2860 \text{m}^3/\text{s}$)。此外,海河在 7 月并未形成大的径流(图 2a),但是由于季节性排污的影响,渤海湾西部 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的浓度均很高。根据吕培顶等(1984)的调查,渤海湾和渤海中部表层叶绿素 a 和初级生产力均是秋季高于夏季。上述因素可能造成了 7 月水化学要素之间没有密切的关系。

(四)三态无机 N 之间的热力学平衡

在 N 循环中,有机 N $\rightarrow \text{NH}_4\text{-N} \rightarrow \text{NO}_2\text{-N} \rightarrow \text{NO}_3\text{-N}$,这是热力学的必然趋势,当达到平衡时, N 最终转化为 $\text{NO}_3\text{-N}$ 。但是在水浅而生产力较高的水域,各种无机 N 之间的热力学

平衡是难以达到的。调查期间三态无机 N 所占的百分比列于表 1。从 7 月至 11 月, $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的百分比均呈下降趋势, 而 $\text{NO}_3\text{-N}$ 则相反, 这表明夏季和初、中秋季 $\text{NH}_4\text{-N}$ 一直是无机 N 的主要存在形式, 直到秋末, $\text{NO}_3\text{-N}$ 才占优势, 但 $\text{NH}_4\text{-N}$ 依然占了很大的份额。

表 1 三态无机 N 所占的百分比(%)

月 份	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NO}_2\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$
7	20.6	14.8	64.6
9	15.4	21.0	63.6
10	40.8	7.9	51.3
11	59.1	3.9	37.0

7 月, $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度较低, 且占 TIN 的比例小, 与春季浮游植物繁殖高峰密切相关(吕培顶等, 1984), 而 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度较高表明了夏季 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的转化程度低。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度在检出限以下的水样数占全部水样的 26.0%, 主要在表层, 也有在 10m 层和底层, 这表明在各个水层都有浮游植物利用 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的情况。在浮游植物将大部分 $\text{NO}_3\text{-N}$ 消耗后, $\text{NH}_4\text{-N}$ 成为水体中无机 N 的主要形式和浮游植物的主要氮源。由于生物利用, $\text{NH}_4\text{-N}$ 来不及转化为 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$, 而构成 $\text{NH}_4\text{-N}$ —浮游植物— $\text{NH}_4\text{-N}$ 的直接循环(顾宏堪, 1976)。7 月, 有的站位 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度也在检出限以下, 占样品总数的 9.4%, 这些站位 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的浓度一般均很低, 这表明无机 N 已被基本耗尽。浮游植物消耗何种无机 N 与浮游植物的粒级结构、光照条件、温度和环境 N 水平等有关。9 月也有类似情况, 可能与秋季浮游植物高峰有关(吕培顶等, 1984), $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度明显低于 7 月, $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度在检出限以下者所占的比例上升至 40.2%, 而 $\text{NH}_4\text{-N}$ 则略有减少, 为 7.2%。当浮游植物不能有效地利用 $\text{NH}_4\text{-N}$ 时, $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 将进一步转化为 $\text{NO}_3\text{-N}$ (赖利等, 1982)。11 月, 随着浮游植物数量的减少, 上述的转化率明显提高, 水体垂直对流有利于这一过程的进行。此外, 三态无机 N 所占的比例也与外源性无机 N 输入的比例有关。顾宏堪(1976)指出, 沿岸生物大量繁殖的海区, 如黄海、东海, 热力学不稳定的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 占了三分之一到三分之二。调查表明, 渤海与上述海区相似, 三态无机 N 之间远没有达到热力学平衡状态。

(五) 水化学环境与水域生产力

本次调查结果与 1959 年黄海水产研究所^①在相同调查区 78 个站位(9 月、10 月和 11 月表、10m 层和底层全部数据)的营养盐数据列于表 2。从表中可以看出, 24 年间除了 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度基本未变外, $\text{NO}_3\text{-N}$, TIN 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度分别增加了 1.9 倍、0.4 倍和 1.3 倍。统计表明, 1959 年 9、10、11 月 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度在检出限以下的数据分别占全部数据的 72%, 55% 和 7.5%, 比本次调查的比例高得多。营养盐的增加主要是由于黄河、海河和滦河等沿岸河流携带大量工业和生活污水输入的缘故。以黄河为例, 1984 年由黄河输出的 TIN 为 84500t, $\text{PO}_4\text{-P}$ 为 1450t, 分别是 1959 年的 2.3 倍和 2.6 倍(沈志良, 1993)。海水中

^① 国家海洋局海洋科技情报研究所, 1975, 海洋调查资料第二册(内部资料)。

营养盐的增加为提高水域生产力提供了重要保证。据报道(林庆礼等,1991),1982年渤海浮游植物数量的年平均值为 637×10^4 个细胞/ m^3 , 是1959年(361×10^4 个细胞/ m^3)的1.8倍。1980—1981年渤海叶绿素a和初级生产力的年平均值分别为 $0.91 \text{ mgC}/\text{m}^3$ 和 $230 \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 其中渤海湾二者分别为 $1.09 \text{ mgC}/\text{m}^3$ 和 $149.3 \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ (吕培顶等,1984)。尽管1983年营养盐比1959年有了显著增加,但是氮、磷原子比依然很小,这表明无机氮始终是调查区浮游植物繁殖的限制性因素。

表2 1959—1983年秋季营养盐浓度的变化

年份	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NO}_2\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$	TIN	$\text{PO}_4\text{-P}$	TIN/ $\text{PO}_4\text{-P}$	$\text{NO}_3\text{-N}/\text{PO}_4\text{-P}$
1959	0.89	0.22	3.29	4.40	0.39	11.3	2.3
1983	2.57	0.59	3.11	6.27	0.89	7.0	2.9

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。
 山东海洋学院,1986,长江口及济州岛邻近海域综合调查研究报告,山东海洋学院学报,16(1):155。
 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。
 沈志良,1993,黄河口演变对河口水化学环境的影响,海洋科学集刊,34:93—105。
 吕培顶等,1984,渤海水域叶绿素a的分布及初级生产力的估算,海洋学报,6(1):90—98。
 邹景忠等,1988a,渤海湾海河口区的有机污染及其防治途径,海洋科学集刊,29:1—20。
 邹景忠、张景镛,1988b,渤海湾污染的生态影响,海洋科学集刊,29:173—189。
 林庆礼等,1991,渤海增殖水化学环境,海洋水产研究,12:11—29。
 顾宏堪,1976,海水中氮循环的热力学平衡问题,海洋科学集刊,11:1—6。
 J. P. 赖利等(崔清晨等译),1982,化学海洋学(第二卷),海洋出版社,297—317。
 Shen Zhiliang, Liu Xingjun and Lu Jiaping, 1988, Nutrients in seawater and interstitial water of the sediments in the Huanghe River estuarine area (November). *Chin. J. Oceanol. Limnol.*, 6(2):104—114。

HYDROCHEMICAL ELEMENTS IN BOHAI BAY AND ITS EASTERN PART WATERS*

Shen Zhiliang

(Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences)

ABSTRACT

The distributions and relationships of hydrochemical elements (S , pH, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{PO}_4\text{-P}$) in Bohai Bay and its eastern part waters in summer and autumn in 1983 are discussed.

Correlation statistics showed that there were close negative linear relationships between $\text{NO}_3\text{-N}$ or TIN (total inorganic N) or $\text{PO}_4\text{-P}$ and pH in autumn (november) due to the effect of biogeochemical processes.

* Contribution No. 3407 from the Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences.

From July to November, the proportion of $\text{NO}_3\text{-N}$ in TIN increased from 20.6% to 59.1% and that of $\text{NO}_2\text{-N}$ and $\text{NH}_4\text{-N}$ decreased from 14.8% and 64.6% to 3.9% and 37.0%, respectively. Investigations showed that $\text{NH}_4\text{-N}$ was the main existence form of inorganic N in summer, early autumn and middle autumn; and that the thermodynamic equilibrium of $\text{NH}_4\text{-N} \longrightarrow \text{NO}_2\text{-N} \longrightarrow \text{NO}_3\text{-N}$ was unreachable in the surveyed period. $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration was low in summer and early autumn; the samples whose $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations could not be detected comprised 26.0% and 40.2% of all samples in July and September respectively, and was closely correlated to phytoplankton growth. High concentration of $\text{NH}_4\text{-N}$ in summer and early autumn showed that the change rate of $\text{NH}_4\text{-N}$ was low, that the direct cycle of $\text{NH}_4\text{-N} \longrightarrow \text{phytoplankton} \longrightarrow \text{NH}_4\text{-N}$ was formed and that $\text{NH}_4\text{-N}$ was the main source of N.

Compared with 1959 in the same area and same period (except that the $\text{NH}_4\text{-N}$ concentration unchanged) the concentrations of $\text{NO}_3\text{-N}$, TIN and $\text{PO}_4\text{-P}$ increased 1.9 times, 0.4 times and 1.3 times respectively, as a result of a lot of industrial and residential wastes (transported to the study area by coastal rivers such as the Yellow River, Haihe River and Luanhe River) that could enhance the biological productivity there. The low atomic ratio between TIN and $\text{PO}_4\text{-P}$ (average 7.0) showed that inorganic N was the limitation factor for phytoplankton growth.