

海河口和渤海湾潮流场和 COD 扩散的 三维数值模拟*

张法高 于克俊 冷彦贵

(中国科学院海洋研究所)

随着我国经济建设的蓬勃发展,工农业和城市生活产生的污染物日益增多。如何处理这些污染物成了一个急待解决的问题。将污染物化有毒为无毒,当然是最彻底的办法,但这样做花费巨大,我们目前尚难做到。目前最常用的办法是将污染物排入海。但过多的排放,超过了海洋的自净能力,就会污染海洋环境和海洋资源,进而影响人民的健康。所以,须要对污染物排入海的方式、地点等加以选择,并对其排入海的数量、速率等加以控制。这就要求我们了解海区对污染物的净化能力和在国家规定的标准下海区对污染物的最大容量。为了很好地解决这个问题,我们必须了解特定海区对污染物的稀释扩散起重要作用的海水运动情况。1984 年 5, 8, 10 三个月,我们在渤海湾海河口区进行了海上调查,并结合历史资料,以 COD 为指示因子,进行了渤海湾有机污染物在潮流作用下稀释扩散的数值计算。

一、渤海湾水文气象概况

渤海湾是指渤海位于滦河口—老黄河口联线以西的部分,处于北纬 $38^{\circ}00'$ — $39^{\circ}10'$,

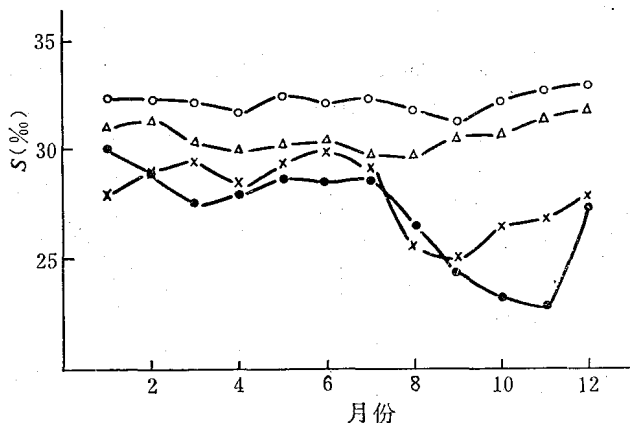


图 1 塘沽海洋站每天观测一次的盐度月平均值

● 1975 年; × 1978 年; △ 1980 年; ○ 1982 年

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 1355 号。

本文承毛汉礼教授审阅,文中插图由杜涓山同志清绘,特此志谢。

收稿日期: 1986 年 8 月 6 日。

东经 $117^{\circ}40'$ — $119^{\circ}00'$ 之间。它近于方形,南、北、西三面为陆地环绕,西面湾顶有天津市,东面完全敞开,同渤海中部相接。渤海湾的深度大致上是西南部浅,东北部深,近东北角处有一凹陷,最大深度约 33m。

渤海湾处于温带季风气候区,“夏半年”(3—8月)盛行偏南风,“冬半年”(9—2月)

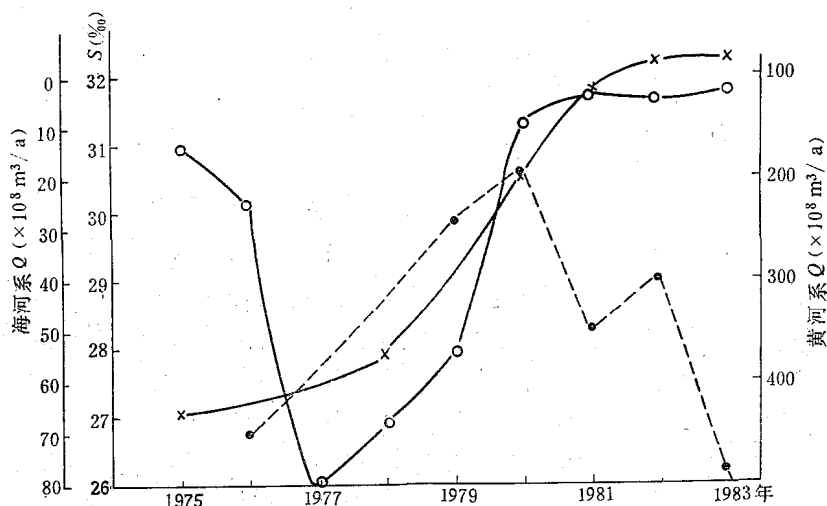


图2 塘沽海洋站年平均盐度多年变化与海河、永定新河及黄河年径流量

× 塘沽站盐度; ○ 海河永定新河系径流量; ● 利津站黄河流量

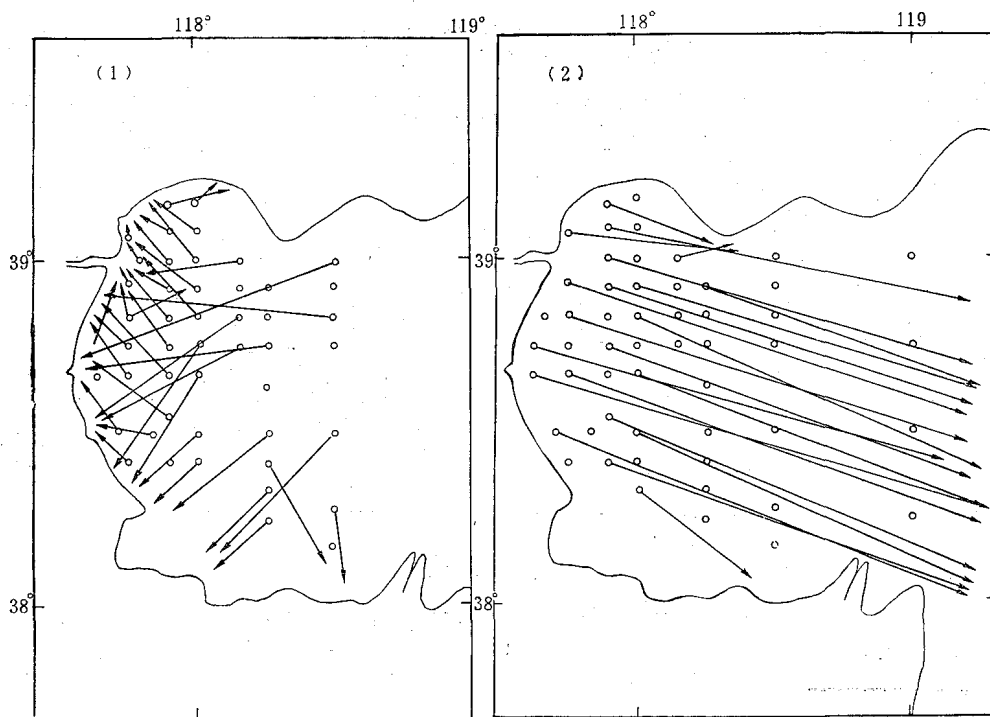


图3 渤海湾漂流卡漂移路径

(1) 1979年5—6月; (2) 1979年11月

盛行偏北风。年降雨量和河流径流量有 70% 集中在 7, 8, 9 三个月。据塘沽海洋站资料, 1975—1982 年间, 渤海湾各年对应月份水温的月平均值相当一致, 没有出现什么特异现象。但自 1975 年以来, 由于黄河入海口的位置变动和天津地区入海径流量的显著减少等原因, 渤海湾的盐度变化极大: 例如塘沽海洋站夏秋季的月平均盐度最低值逐年升高, 盐度月平均值的年变幅逐年变小 (图 1), 盐度的年平均值逐年升高 (图 2); 1982 年的盐度常年维持在 32‰ 左右的高值, 这样高的盐度年平均值, 在 1958—1959 年全国海洋普查时只在南黄海中部深处才见到。

渤海湾的水流以潮流为主, 基本上是东西向的往复流。渤海湾的常流不大, 比潮流小一个量级以上; 遇大风天气, 常流稍大些, 流向多随风向不同而异。由于扩散过程总是不可逆地由高浓度区向低浓度区, 也由于流速空间分布的不均匀, 潮流的往复加速了污染物从高浓度区向低浓度区的运动, 故整年之内潮流和扩散都对海水的净化起着有利的作用。但常流的情况则不同, 渤海湾冬半年常流流向湾外, 有利于本海区海水的净化; 而在夏半年常流流向湾顶, 对海水净化不利 (见图 3)。

二、COD 的实测结果

据天津环保局的测量, 1979—1984 年间各年由南、北排污河入海的有机污染物的 COD 总量统计如表 1。

表 1 南、北排污河入海有机污染物的 COD 年总量

年 份	1979	1980	1981	1982	1983	1984	平均
COD 入海量 (10^4t/a)	19	19	16	10	12	13	14.8

由表 1 知, 南、北排污河入海的 COD 年平均总量为 $15 \times 10^4\text{t}$, 且近年有下降趋势。

一年中各月南、北排污河入海的 COD 量很不均匀, 差别很大。例如, 1984 年 3 月份两排污河入海的 COD 量为 $0.5 \times 10^4\text{t}$; 5 月份则为 $2.3 \times 10^4\text{t}$, 是 3 月份的 4.6 倍。

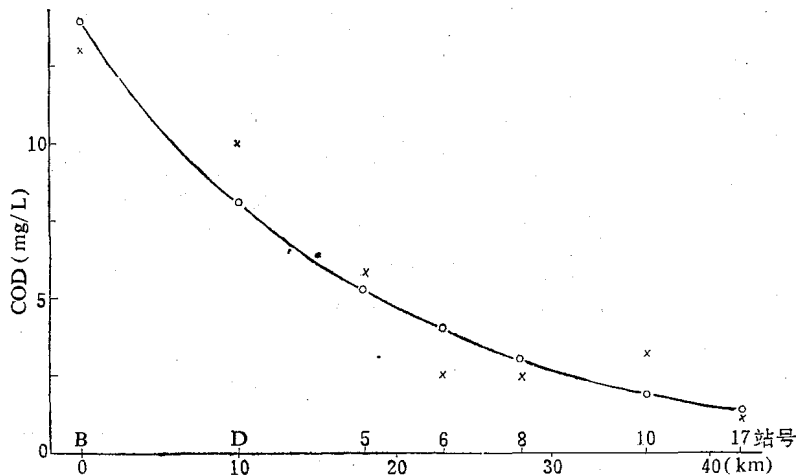


图 4(1) 北塘口断面 COD 含量随距离按指数递减
× 实测值 (1984 年 8 月); ○ 计算值

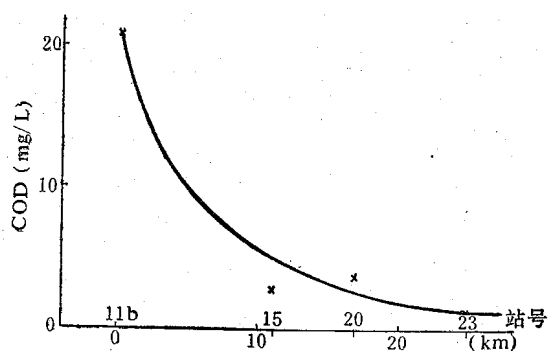


图 4(2) 南排污河口断面 COD 含量随距离按指数递减 (1984 年 8 月)

1984 年 5, 8, 10 三个月, 我们在海河口海区和北塘口近入海口的河段中观测了 COD。结果表明, 5 月份在离大沽口和北塘口 5km 的范围内, COD 浓度在 3mg/L 以上, 距离大沽口和北塘口 5 km 以外的海水都是干净的; 8 月份是洪水季节, 河中水量增加, 流量增大, 河道中的 COD 浓度降低, 但仍为 8—20 mg/L; 大量河水泄入海中, 影响塘沽东南约 20km 见方的海域, 其 COD 浓度接近或超过 3mg/L。8 月份, 自永定新河河道中的 B 站 (下距入海口约 20km) 沿河道伸向海中 17 号站 (上距入海口约 22km) 的断面上, COD 浓度按指数递减 (图 4(1)), 其回归方程为:

$$C_1 = 14e^{-0.055l_1}$$

其中 C_1 为 COD 浓度, l_1 为自 B 点起算的距离 (km), 常数 14 为 B 点 24h 的 COD 平均

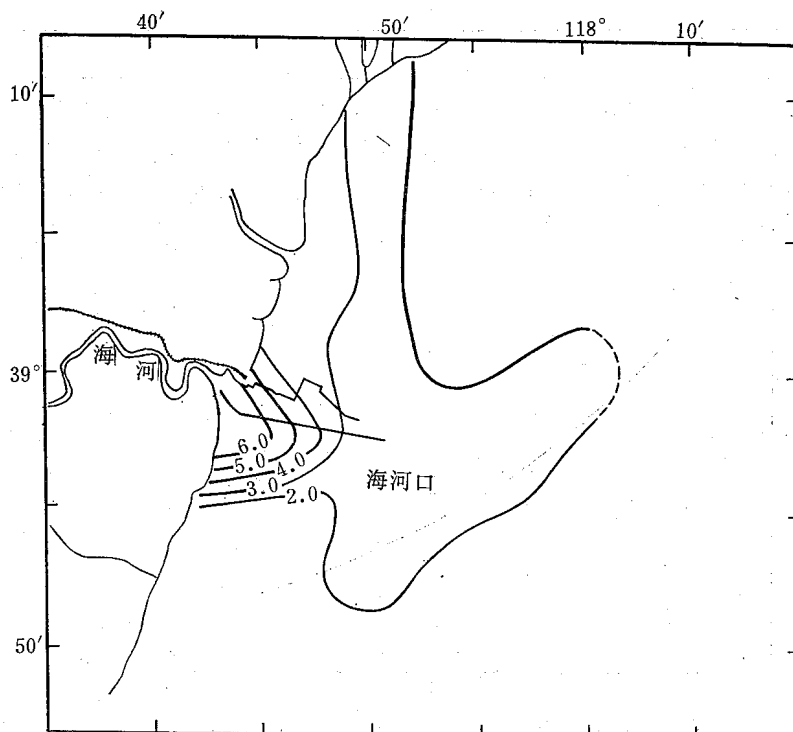


图 5 1984 年 5, 8, 10 月 COD 平均浓度平面分布 (表层)

浓度。8 月份, 自南排污河口的 11b 站向东南方向的断面上, COD 浓度也随距离之增加而降低 (图 4(2)), 其降低的速率比北塘口断面快一倍以上, 回归方程大致为:

$$C_2 = 22e^{-0.11l_2}$$

其中 C_2 为 COD 浓度, l_2 为自 11b 站起算的距离 (km)。

到 10 月份, 海上的 COD 浓度分布又恢复大致与 5 月份相同。但同 5 月份相比, 南排污河口的 COD 浓度却比 5 月份稍高一些。

由上述可见, 在枯水季节, 河道中的 COD 浓度虽高, 但海上是干净的; 到洪水季节, 由于河流径流增大, 大量有机污染物随之泄入海中, 河口海区 COD 浓度升高, 近海河道中污染物浓度却被冲稀; 洪水过后, 海区又很快恢复干净。这说明该海区海水的自净能力较大。

图 5 画出了 1984 年 5, 8, 10 三个月 COD 平均浓度的平面分布; 由图可见, 只有离南排污河口 10 km 和离北塘口 5 km 以内的区域 COD 的浓度高于 3mg/L, 此区域之外的海水是干净的。这表明天津近海有机污染仅限于排污河口范围不大的海区。

三、三维潮流场和 COD 扩散的计算

有人计算过渤海或渤海湾的二维潮流场和 COD 扩散, 但还没有人作过三维流场和扩散的计算。考虑到有机污染物的垂直分布是不均匀的, 我们计算了渤海的三维潮流场和潮余流, 同时又计算了渤海湾 COD 的三维扩散。

1. 潮流和潮余流的计算

我们的计算模式建立在 Leendertse *et al* (1973, 1975) 模式的基础上, 结合渤海湾的具体情况作了一些修正。取 x 轴向东, y 轴向北, z 轴向上为正, 坐标原点位于平均海面上的笛卡尔直角坐标系。海水的运动方程组如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} - f_v \\ \quad + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{A}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{K}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} + f_u \\ \quad + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{A}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{K}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = 0 \\ \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \end{cases}$$

其中海水密度 ρ 近似取为常数, 经试算取侧向涡动粘性系数 $A = 10^7 \text{ cm}^2/\text{s}$, 垂直涡动粘性系数 $K = 70 \text{ cm}^2/\text{s}$ 。

将海水在垂直方向分为 3 层, 对每一层垂直积分, 再将方程组用有限差分法化为差分

方程组。取海底摩擦公式为 $\tau_b = \frac{g}{C^2} |\mathbf{V}| \mathbf{V}$, 通过试验, 取其中的谢兹 (Chezy) 系数 $C = 200H^{1/6}$, 这里 H 为水深。

初始条件: 当 $t = 0$, $u = v = w = \zeta = 0$;

固体边界条件: 垂直于边界的速度为 0;

敞开边界条件, 取大连—烟台连线为敞开边界, 取水位 ζ 为据实测调和常数计算的天文潮高;

差分步长: $\Delta x = \Delta y = 14.84\text{km}$; $\Delta t = 207.01002\text{s}$; $\Delta z_1 = 7\text{m}$, $\Delta z_2 = 8\text{m}$, 余下的直到海底为 Δz_3 。

网格结点: 采用水平方向的 u, v 交叉排列, 置 ζ, P 于网格中心, 置 w 于层间的网格中心。

在上述参数和条件下, 用计算机求方程组的数值解, 将计算结果用图表示。图 6 表示

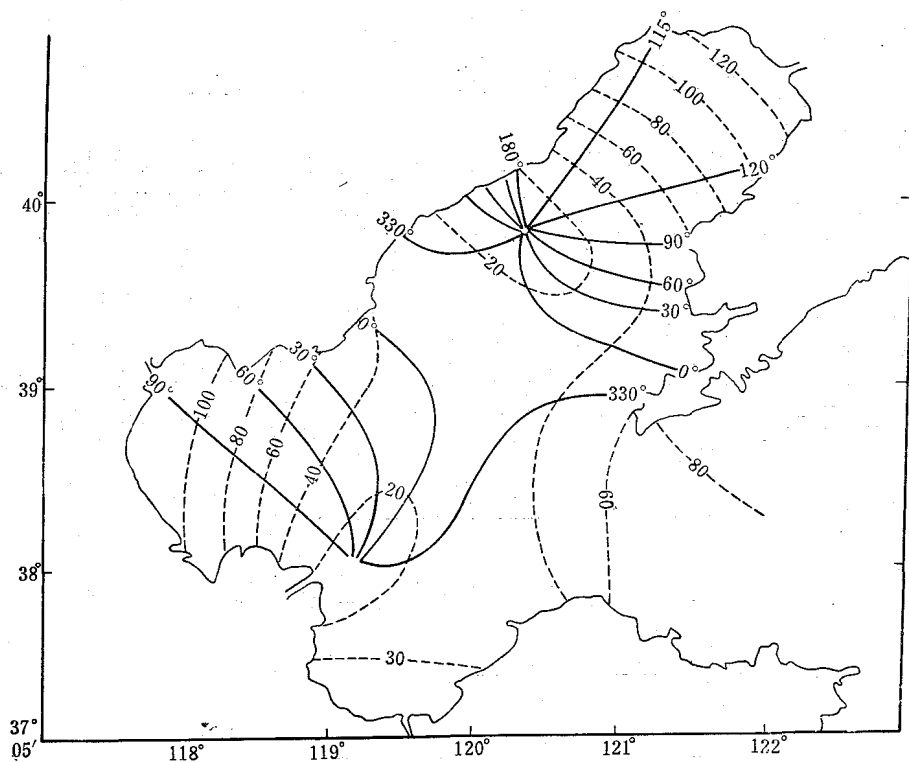


图 6 M_2 分潮同潮时线和等潮高线分布

半日分潮 (M_2) 的同潮时线和等潮高线分布, 图 7, 8, 分别表示太阴时 $t = 1, 7$ 时表层的潮流矢量和潮高分布, 图 9 表示渤海湾中部 A 点潮流北分量 (v) 和东分量 (u) 的垂直分布, 这些计算结果都与实测结果相符。图 10 表示潮余流分布。

下面我们只对渤海湾的潮流和潮余流的情况加以说明。渤海湾的潮流大致上是东西向的往复流, 涨潮时向西流动, 落潮时向东流动。较详细地说, 渤海湾涨潮时西流, 高潮时西南流, 落潮时东流, 低潮时西北流; 渤海湾西北部稍有不同, 低潮和涨潮西北流, 高潮

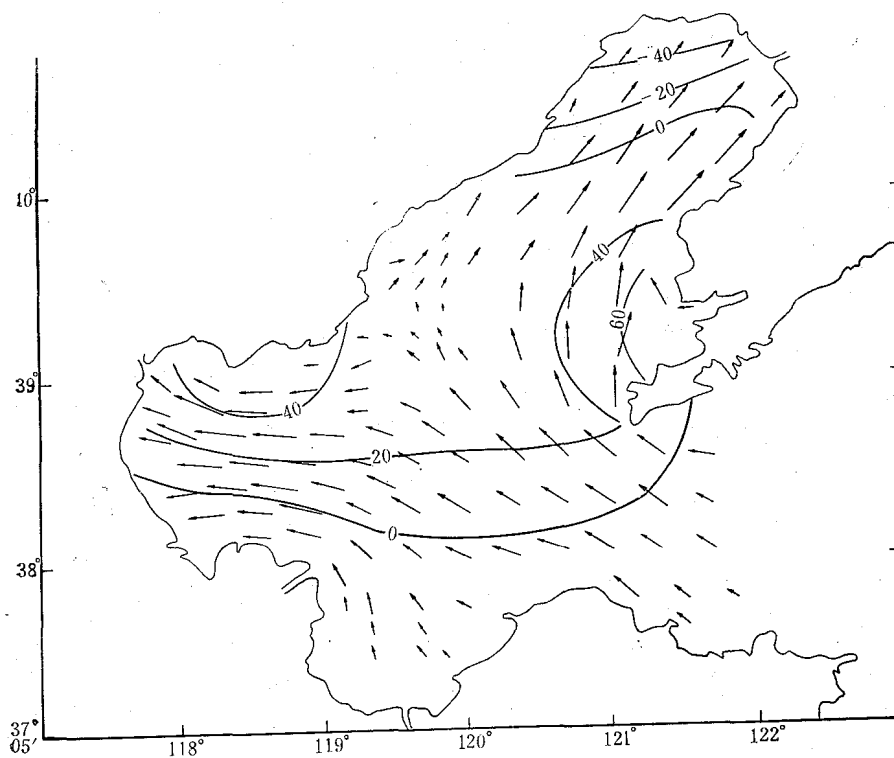


图 7 太阴时 $t=1$ 潮流图 (表层)

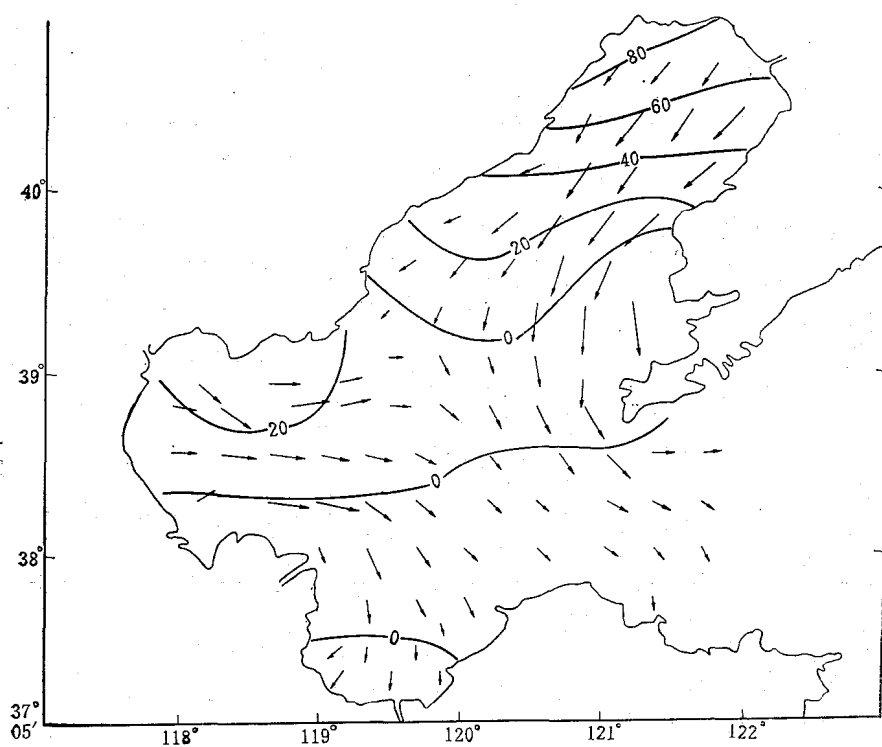


图 8 太阴时 $t=7$ 潮流图 (表层)

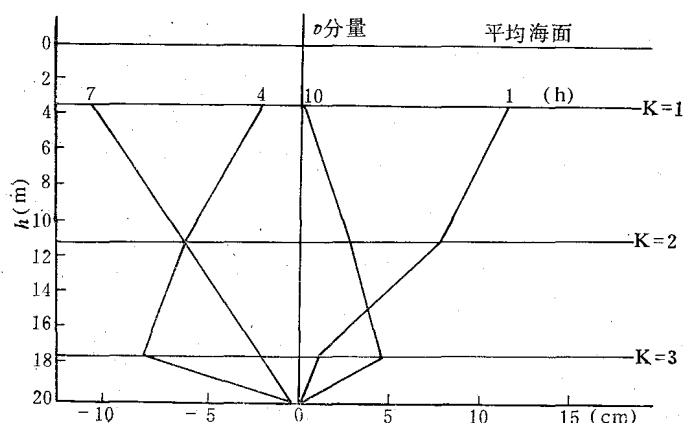


图 9 (A) A 点潮流北分量垂直分布 (表层)

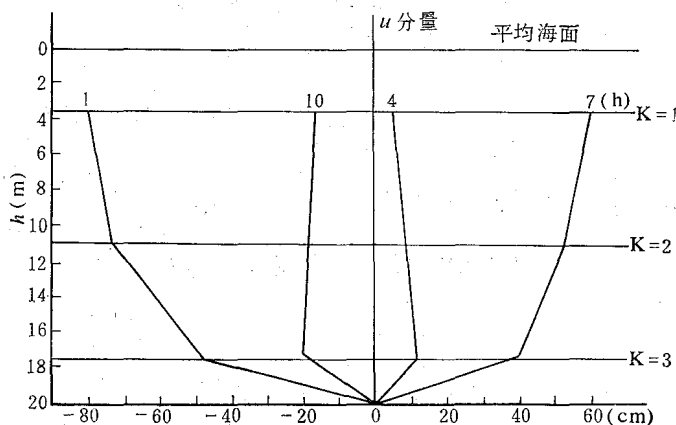


图 9 (B) A 点潮流东分量垂直分布 (表层)

和落潮东南流。潮流流速量值一般约 50—70cm/s, 有的地方达 100cm/s 以上, 涨潮流大于落潮流。因摩擦影响, 潮流速度的量值上层大, 下层小, 其垂直分布大致符合对数分布律; 潮流的位相, 随离海底距离的减小而稍稍超前。渤海湾北部潮余流量值较小, 方向也不一致; 在其中南部, 潮余流方向稳定, 指向东南, 其量值大致为 1.5cm/s, 在老黄河口附近, 潮余流速度较大, 约为 2—5 cm/s。中层和底层潮余流方向与表层的大致相同, 但量值较小。

2. COD 三维扩散的计算和环境容量的估计

在计算潮流场的同时, 我们也计算了 COD 的三维扩散。从一般的扩散方程出发,

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial (u\varphi)}{\partial x} + \frac{\partial (v\varphi)}{\partial y} + \frac{\partial (w\varphi)}{\partial z} = D \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + R$$

方程中 φ 为 COD 浓度, D 和 K 分别为水平和垂直湍流扩散系数, R 为源强度, u, v, w 分别为潮流的东、北和垂直分量, 其坐标设置如前。所取空间差分步长与计算潮流时相同, 但时间差分步长取 $\Delta t = 621.0306s$ 。

初始条件: 当 $t = 0$ 时, COD 浓度为 0;

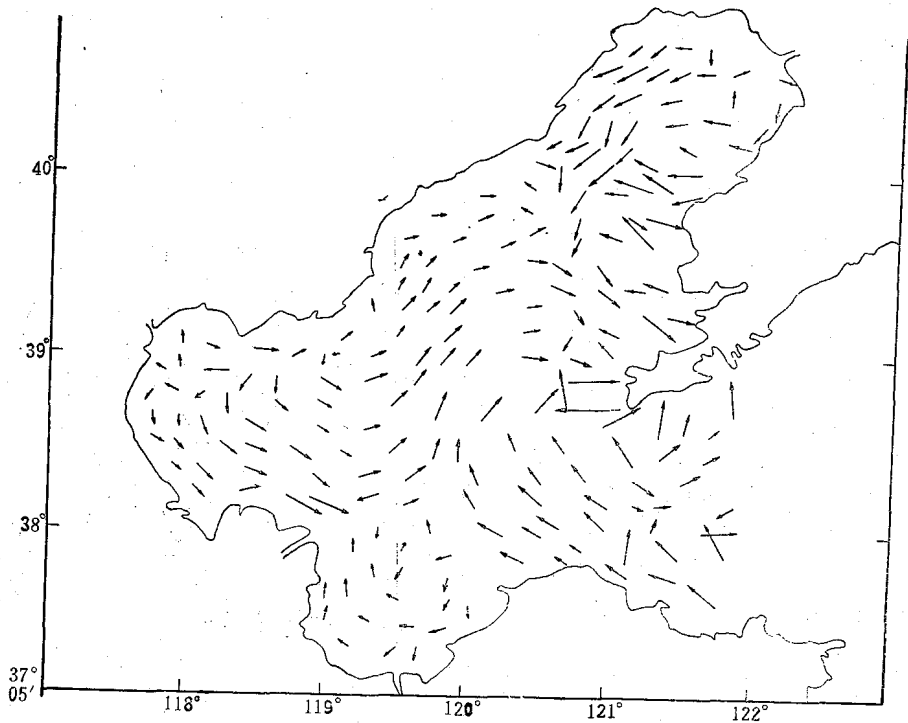


图 10 渤海表层潮余流 (计算结果)

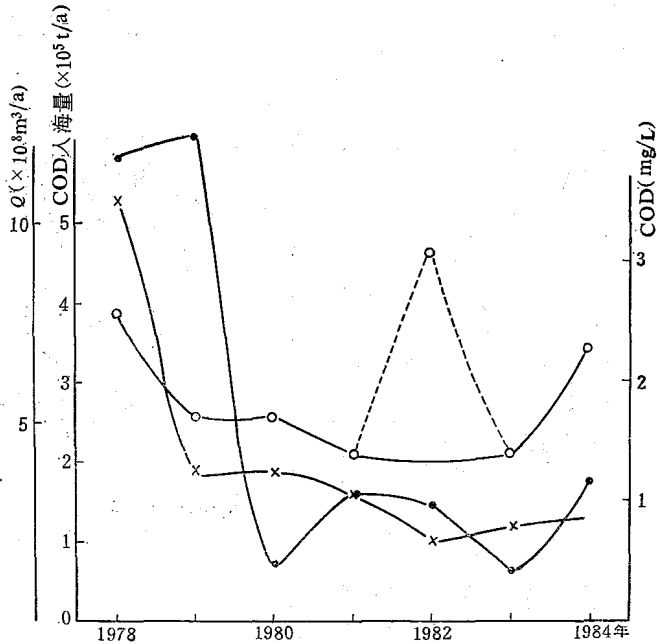


图 11 南、北排污河 COD 年入海量与年径流量

● 年径流量； × COD 年入海量； ○ 海水中 COD 平均浓度

固体边界条件：无穿过固体边界的物质交换；

敞开边界条件：取东经 120° 线为敞开边界，边界外 COD 浓度近似为 0，落潮时有物质被带走。

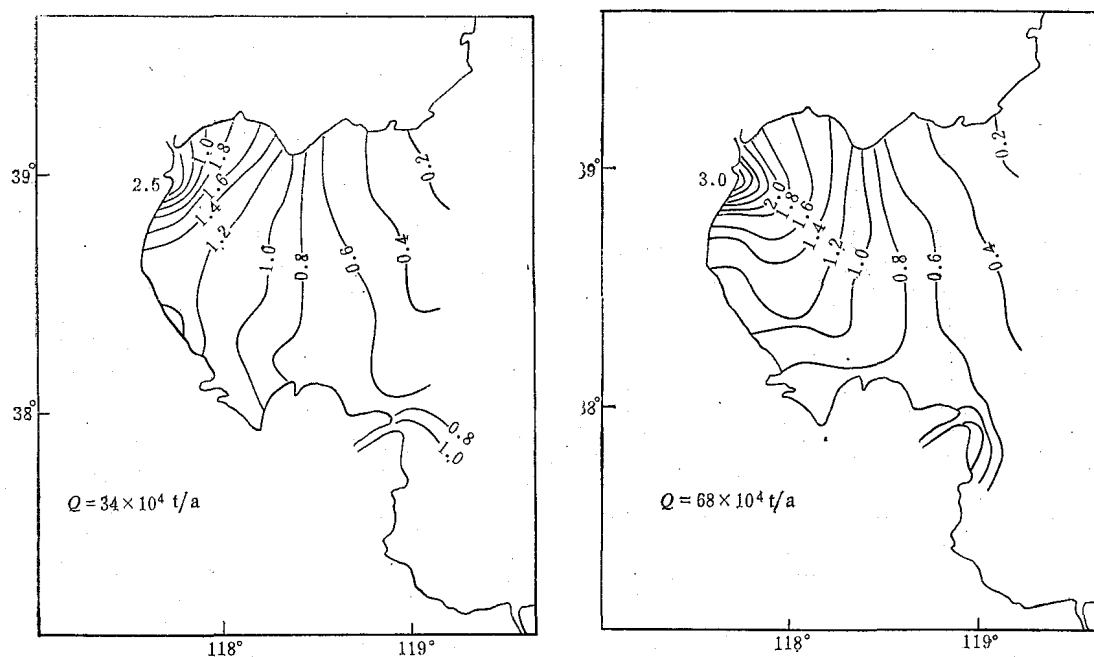


图 12 一个潮周期中 COD 浓度最高值(表层)

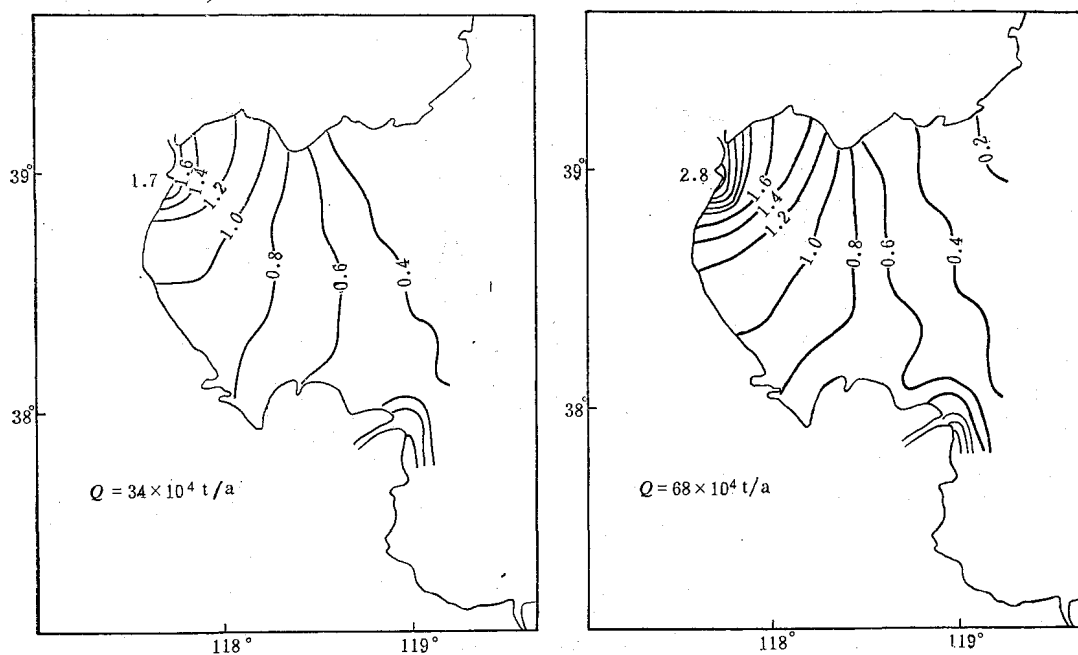


图 13 一个潮周期中 COD 浓度平均值(表层)

经试算选择,取水平扩散系数 $D = 10^6 \text{cm}^2/\text{s}$, 垂直扩散系数 $K = 10 \text{cm}^2/\text{s}$ 。将扩散方程对每一层积分,海面起伏 ζ 用潮高计算值,化扩散方程为差分形式。

COD 源强度(输入)根据现有资料确定。如前所述,据天津环境保护局的观测和统计,1979—1984 年间,平均每年由南、北排污河入海的 COD 总量为 $14.8 \times 10^4 \text{t}$ (见图 11); 又据环保部门估计,由南、北排污河入海的 COD 占天津沿海入海 COD 总量的 60% 以上。按天津实测数据,在南、北排污河 COD 入海总量中,南排污河的 COD 入海量约占 80%,北排污河仅占 20%。据此我们以 $15 \times 10^4 \text{t/a}$ 作源强度,并按 80% 和 20% 的比例分大沽口和北塘口两点随时间均匀地输入;在黄河口,按 1983 年黄河利津站的数据 1049.02t/d 也随时间均匀地输入。进行了计算,结果表明:计算 60 个潮周期以上,获得了稳定的数值解。

计算结果还表明:天津近海的 COD 浓度随潮流的进退而变动;近岸 COD 浓度高的海水,涨潮时被推向岸边,落潮时离岸向外移动,所占面积增大,使海上 COD 浓度略增高。在一个潮周期中表层的最高值和平均值的水平分布如图 12, 13 所示。由图可见:天津近海的 COD 高浓度区比黄河口的面积大、中心浓度高、水平梯度大,而且随源强度(输入)的增大,其面积、中心浓度值、水平梯度大的地带(锋面)离岸距离均增大。黄河现在改道向东于莱州湾入海,故对渤海湾天津近岸 COD 的浓度影响不大。COD 垂直分布如图 14 所示。

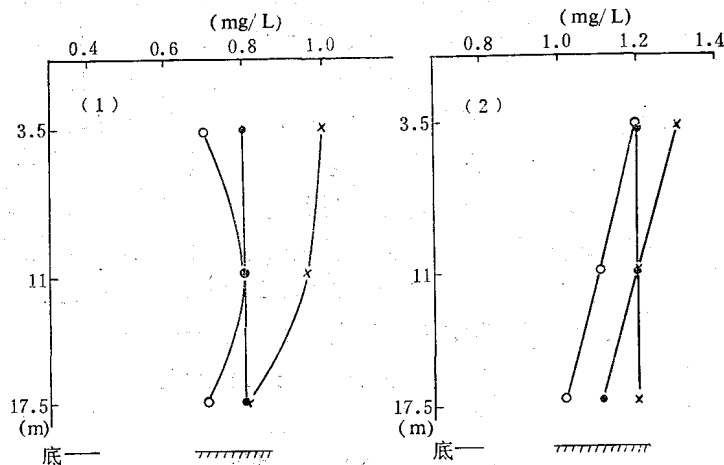


图 14 COD 浓度垂直分布(P 点, 计算值)

(1) 源强度 Q_1 ; (2) 源强度 $3Q_1$; × 最高值; • 潮平均值; o 最低值

海洋的环境容量和自净能力随海区不同而异。我们从实际情况出发,根据天津入海排污口目前配置状况,对天津近海的环境容量作一大概的估计。为此,我们分析了大沽口 COD 高浓度区的情况。该区 COD 浓度在一个潮周期中的最高值、最低值和平均值皆随输入量而变化。根据计算结果,在不同源强度(输入)下,该区 COD 平均浓度在一个潮周期中的最高值如表 2 和图 15 所示。

因为差分网格为 $15\text{km} \times 15\text{km} \times 7\text{m}$, 表中数值为一个网格体积中 COD 浓度的平均值。又从图 15 可以看出:在此高值区及其附近, COD 浓度的水平梯度约为 $1/15$

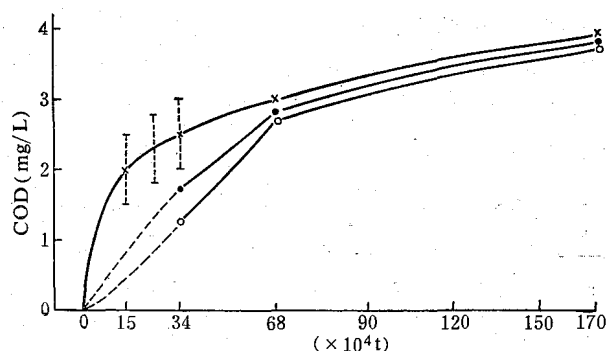


图 15 大沽口 COD 浓度随输入量的变化(均匀输入)

× 最高值; ● 潮平均值; ○ 最低值

表 2 大沽口区平均 COD 浓度最高值

天津近海 COD 总输入量 ($\times 10^4$ t/a)	15	34	68	70
大沽口 COD 平均浓度 最高值 (mg/L)	2.0	2.5	3.0	3.5

(mg/L·km), 垂直梯度约为 $0.5/7$ (mg/L·m), 所以当此网格内 COD 平均浓度为 2.5mg/L 时, 其表层高浓度一侧(靠岸一边) COD 的浓度可能达到 3.0—3.3 mg/L。

我们取年输入量为 34 万吨的试验, 恰好是这一情况。这时, 在此区的高浓度一侧会有不大的范围被污染, 如按网格的三分之一计算, 从南排污河口算起, 此范围可能有 5km。当输入为 15×10^4 t/a 时, 该区 COD 平均浓度为 2.0mg/L, COD 浓度的水平梯度和垂直梯度均与年输入量为 34×10^4 t/a 时大致相同。由此推算, 该区高浓度一侧 COD 的浓度约为 2.5—2.8 mg/L。这时, 天津近海不会造成污染。根据这些计算结果, 可以估计: 在目前排污地点配置和 COD 随时间均匀输入的条件下, 天津近海 COD 的环境容量约为 22×10^4 t/a, 即 600 t/d。当 COD 输入量为 22×10^4 t/a, 且南排污河与北排污河的 COD 入海量为 80% 与 20% 之比时, 在南排污河口门处 1—2km 的范围内, COD 浓度可能会超过 3mg/L (这是很难避免的), 此外的海水将是良好的。

四、讨 论

天津近海为有潮河口海区, 近海河段为有潮河段, 水文情况复杂多变, 要得到大量代表性好的资料很不容易, 我们目前对它的认识还只是初步的, 所以在现有认识基础上进行的数值计算也是粗略的。现提出下列几点意见作为本文的结束。

1. 经过计算, 估计天津近海 COD 的环境容量约为 22×10^4 t/a。据环境保护部门估计, 自南、北排污河入海的 COD 量占天津近海 COD 入海总量的大部分, 如果我们认为其他量少且分散的排污点影响不大, 将其略而不计(洪水造成的问题另当别论), 视这 22×10^4 t/a 全部是从南、北两排污河入海, 以期获得一个数量分配的大概, 那末, 南排污河 COD 入海量按占总量的 80% 计, 是 17.6×10^4 t/a, 即 482 t/d; 北排污河按占总量的

20% 计, 是 $4.4 \times 10^4 \text{ t/a}$, 即 120 t/d 。如按此每日限量均匀排放, 海区一般是不会出现污染的。在以往的统计数字中, 各年 COD 入海总量均不高于 $22 \times 10^4 \text{ t/a}$, 但有时却有污染发生, 这主要是由于排放不均匀造成的。暴雨和洪水引起的 COD 突然大量入海, 以及污水库中所蓄污水随洪水一起泄入海中等等, 均属不均匀排放之列。如 1984 年 5 月, COD 入海量就是同年 3 月的 4.6 倍, 南排河 COD 入海量为 $2.3 \times 10^4 \text{ t/月}$, 这相当于 $28 \times 10^4 \text{ t/a}$, 或 767 t/d , 超过了上述限制, 海上现场调查也观测到范围不大的污染。1984 年 8 月天津近海出现的较大面积的污染恰在暴雨之后, 即说明这一污染就是暴雨后大量污水入海造成的。

2. 范围广大、开阔、水深、流急的海区环境容量是很大的。但绝大多数排污地点都在岸边, 排污口的数目是有限的, 而且排放也不均匀, 所以往往造成海区局部污染。为避免局部污染, 将排污口分散, 或移至急流区, 或将排污管口伸入离岸较远海中等等都是比较可行的解决办法, 采用何种办法为好, 应根据具体条件而定。

在有潮河口海区和近河口有潮河段中, 环境因子的日变化显著, 在锋面处变化尤其大。例如, 1984 年 8 月的周日连续观测表明: 在北塘镇旁永定新河河道中心的 D 站 (下距河口约 8 km), 盐度变幅高达 18‰ (见图 16); 处于北排污河入口下侧永定新河河道中心的 B 站 (下距河口约 18 km), COD 浓度的日变幅为 5.86 mg/L 。有鉴于此, 为提高观测数据的代表性, 环境因子这种显著的日变化须适当加以注意。

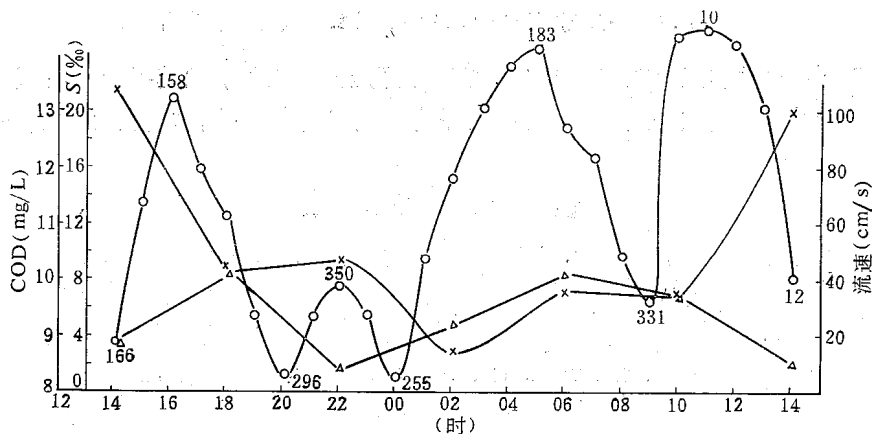


图 16 D 站流速、COD 和 S 的日变化 (1984 年 8 月 23—24 日)

○ 流速; △ COD; × S; 曲线上数字为流向

3. 这里只计算了 COD 的潮扩散。当然在近岸海区一般潮扩散是主要的, 在天津近海这个以潮流为主的海区也不例外, 但风和风海流也有一定作用。天津近海夏半年多东风, 表面流指向西和西北, 促使污染物移向天津岸边; 冬半年多西北风, 表面流指向东和东南, 污染物被吹送和携带出渤海湾。由此可知, 控制污染物的排放量, 冬半年多排些, 夏半年少排些, 对防止天津近海污染是有利的。天津近海的潮流基本上是东西向往复流, 涨潮时西流, 落潮时东流, 所以为防止近岸被污染, 落潮时排污是有利的。

近年来渤海湾盐度的升高对海洋生物会有一定影响, 值得注意和研究。

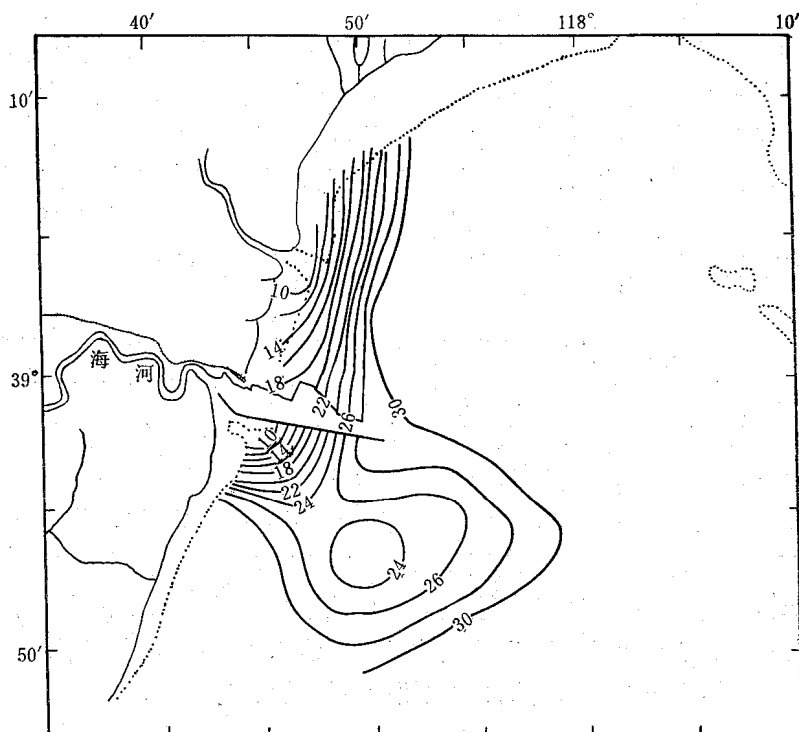


图 17 渤海湾海河口 1984 年 8 月海水表层盐度分布

要说明的是,我们这里的 COD 环境容量计算是很粗略的,尤其对北塘口区域分析不够细致,如果要进行更准确的计算,需要较好的实测资料作基础,这有待今后进一步努力。

参 考 文 献

- 窦振兴等,1982。渤海水质控制模型研究: I. 潮流污染扩散模型。海洋环境科学 1(1): 27--54。
- Leendertse, Jan J., Richard C. Alexander and Shiao-Kung Liu, 1973. A Three-dimensional Model for Estuaries and Coastal Seas: Volume I. Principles of Computation. The Rand Corporation, R-1417-OWRR, pp. 57.
- Leendertse, Jan J., and Shiao-Kung Liu, 1975. A Three-Dimensional Model for Estuaries and Coastal Seas: Volume II. Aspects of Computation. The Rand Corporation, R-1764-OWRT, pp. 123.

A THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL MODEL FOR THE COD DISPERSION IN THE HAIHE RIVER MOUTH AND THE BOHAI BAY*

Zhang Fagao, Yu Kejun and Leng Yangui

(Institute of Oceanology, Academia Sinica)

ABSTRACT

Seeing that the observed vertical distribution of pollutant is not uniform, in this article a three-dimensional numerical model on the tidal current and the COD dispersion in the Haihe River mouth and Bohai Bay was developed based on Leendertse (1979). The horizontal and vertical distribution of tidal current and COD concentration computed on this model are all in agreement with observations. By this model the maximum allowable load of pollutant for that area (so called environmental capacity) was discussed. It was pointed out that, the yearly total of pollutant discharged into that area was never beyond the limit up to now, but there did occur pollution near-shore at the upper layer sometimes, the reason is that the pollutant discharge speed was extremely uneven in the course of a year, and that a considerable amount of wastewater suddenly came from a few sites in rainy season.

* Contribution No. 1355 from the Institute of Oceanology, Academia Sinica.