

青岛沙子口近岸海域海水稀释 扩散的经验模式

姜太良 刘光章

(国家海洋局第一海洋研究所, 青岛)

王洪升 孙培铨

(海军司令部防化部, 北京)

提要 利用水中荧光计、航空摄影和陆地定位立体观测手段, 于1984年和1985年在青岛沙子口近岸海域进行了数次现场示踪试验。研究了示踪剂在海水中的时空分布, 计算了稀释因子、扩散方差和扩散系数及其变化规律。得到半经验、半理论的稀释扩散模式, 推算出污染物的污染时间和范围。

海水的稀释扩散是一个十分复杂的问题。在近岸海域, 弯曲的岸线、不同的水深、变化的天气、随机的海浪和周期性的潮流都将对海水的扩散产生直接影响。在这个领域, Joseph 和 Sendner^[4], Озмидов^[6], Okubo^[5] 和张法高^[2]等人做了不少理论研究, 但任何一个解析模式都带有一定的局限性。目前, 国际上所采用的现场示踪试验、物理模型试验和数值模拟这三种方法, 已成为主要的研究手段。

为了探讨青岛沙子口近岸海域海水的稀释扩散特性, 我们在1984年和1985年于7号站(近岸)和2号站(近海)(图1)进行了现场示踪试验。得出该海域稀释扩散模式。

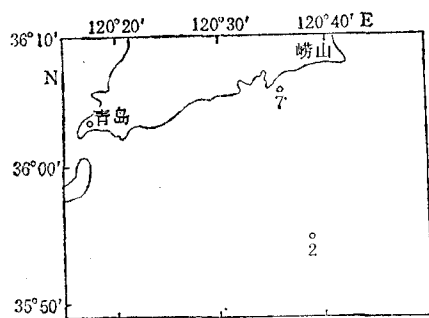


图1 试验站位

Fig. 1 Stations in the experimental area

一、海水的稀释扩散特征

海水的小尺度扩散特性受到风、浪、流、潮和地形等多种因素的制约, 其动力机制和水的运动十分复杂。通过现场示踪试验, 借助于色团和色带的分布, 峰值浓度、扩散方差和扩散系数, 就能较全面地反映出扩散的特征。

1. 色团的分布

以瞬时点源的排放方式把示踪剂投入海中, 海面形成一色团并逐步扩大、平移和变形。利用水中拖曳荧光计在色团的纵向、横向和垂向分别进行拖曳观测, 得到色团的纵、横和垂向的浓度分布曲线(图2, 3)。

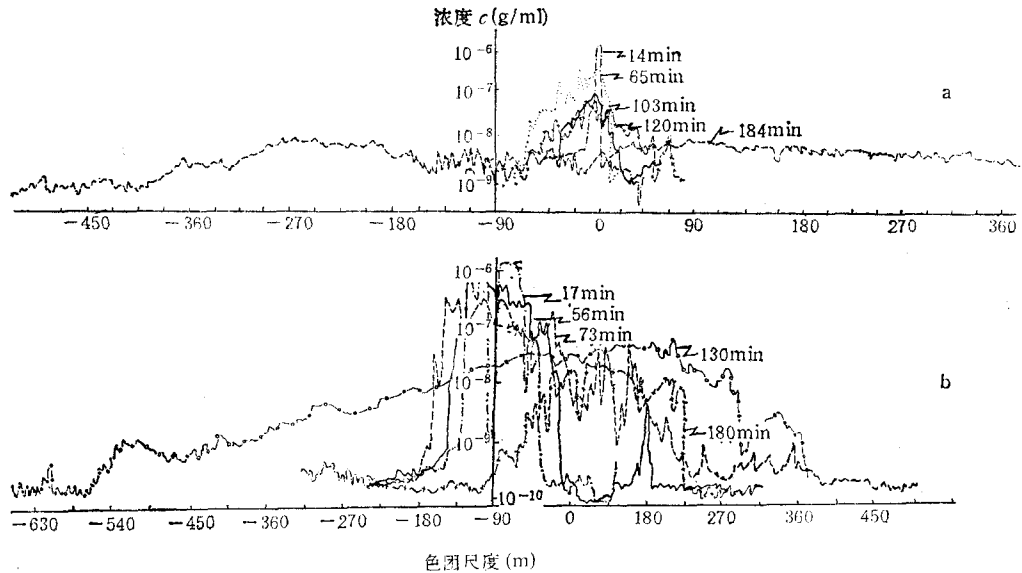


图 2 Rhodamin B 浓度分布曲线

Fig. 2 Distribution curves for Rhodamin B concentration

a. 7 号站, 6 月 5 日 07: 38; b. 2 号站, 6 月 5 日 15: 21.

图 2a 反映 7 号站 6 月 5 日上午色团的水平扩散情况。排放染料 20kg, 初始浓度 c_0 为 10^{-2} g/ml, 初始排放时间 $t_0 = 07:38$ 。图中 5 条曲线分别代表扩散时间为 14, 65, 103, 120 和 184min 时的浓度分布。从这里可以看出如下特点:

(1) 浓度曲线不断趋向平滑, 峰值浓度 c_m 逐渐降低, 其经验关系为

$$c_m = 5.86 \times 10^8 c_0 t^{-3.61} \quad (1)$$

(2) 色团的尺度迅速增大。扩散 14min 时, 色团长 20m; 65min 时, 色团长 135m; 120min 时, 色团长 200m; 184min 时, 色团长达 1km。

(3) 横向和纵向扩散速度不一样。横向扩散得慢, 纵向扩散得快, 两者之比值约 1/2 至 1/5。色团的纵轴与流向基本一致, 当海流转向时, 色团变形厉害。色团的拉长主要是潮流的切变作用。观测期间, 表层流速达 96cm/s, 流向 $91^\circ(\text{E})$; 10m 层流速为 87cm/s, 流向 $87^\circ(\text{E})$; 二层的垂直梯度达 $1\text{cm}/(\text{s} \cdot \text{m})$ 。流速的梯度越大, 上下层色团的长度差越大, 延伸越长, 且色团前部表层较浓。

图 2b 表示 2 号站 6 月 5 日下午的色团扩散情况。排放的染料和初始浓度与 7 号站一样。其中心浓度逐渐下降, 浓度曲线逐渐平滑, 色团不断增大。但扩散的速度比 7 号站慢。其中心浓度下降的经验关系为

$$c_m = 5.53 \times 10^5 c_0 t^{-2.76} \quad (2)$$

当扩散时间延续到 180min 时, 色团长 500m, 仅为 7 号站的 1/2 长。这时的流速较小, 表层为 7—14cm/s, 流向 $230^\circ(\text{SW})$; 5m 层流速为 12—29cm/s, 流向 $230^\circ(\text{SW})$; 10m 层流速为 35—51cm/s, 流向约 $250^\circ(\text{SW})$; 其切变梯度为 $-2\text{cm}/(\text{s} \cdot \text{m})$ 。流速较小是导致 2 号站比 7 号站扩散慢的主要因素。

由于海水的对流混合和湍流涡动, 色团在表面扩散的同时, 在垂向也不断发展。图 3a

反映在 7 号站扩散了 6 个小时的垂直分布状况。浓度曲线上下一致、垂直均匀,垂直方差为 12.4m^2 , 垂直扩散系数约 $1 \times 10^{-5} - 7 \times 10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$ 。

图 3b 为 2 号站扩散了 100min 左右的状况。这时色团在垂直方向上处于发展阶段。5m 层以浅基本均匀,浓度为 10^{-7}g/ml ; 5—10m 层为梯度较大的一段,浓度由 10^{-7} 降到 10^{-9}g/ml ; 10—15m 层以下,也比较均匀,浓度为 $8 \times 10^{-10}\text{g/ml}$,为本底水平,说明染料还没扩散到这一层。其垂直扩散方差为 13.8m^2 , 垂直扩散系数为 $2.32 \times 10^{-3}\text{m}^2/\text{s}$ 。5—10m 层所以出现较大的浓度梯度,主要因为这里存在一较强的温跃层(图 4),它像一个屏障,挡住海水及污染物质上下的对流混合。

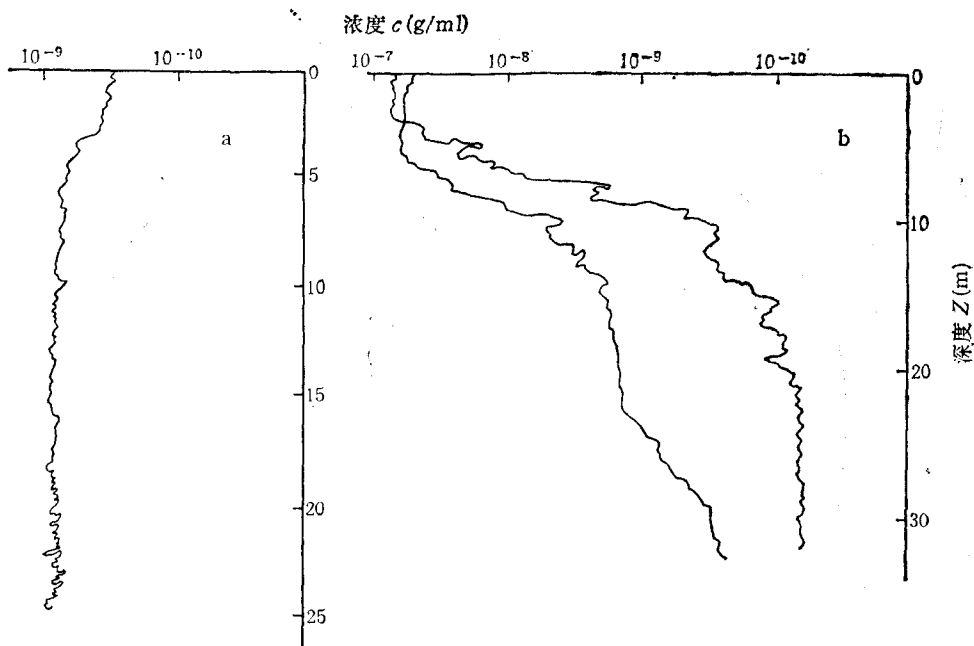


图 3 染料浓度在色团中的垂直分布

Fig. 3 Vertical distribution profiles for dye concentration in the patch

a. 7号站, 6月5日, $t_0 = 06:00$; b. 2号站, 6月5日, $T_0 = 15:22$ 。

2. 色带的分布

在 7 号站分别于涨潮期和落潮期作了二次连续点源排放试验,以了解色带的纵向和横向分布(图 5)。

(1) 色带的纵向中线浓度,无论在涨潮期还是落潮期,均约 10^{-8}g/ml ,比排放浓度 10^{-3}g/ml 降低 5 个量级。

(2) 纵向扩散方差约 10^5m^2 , 横向方差约 $1.5 \times 10^3\text{m}^2$, 色带上各段的横向方差都比较一致,浓度接近正态分布。

(3) 涨潮期间,色带随潮流向西南方向延伸;落潮时,色带向东北方向延伸,长度在 4km 左右达到平衡。

(4) 色带的宽度在 100—300m 的范围,色带的前进速率约 35cm/s ,其主轴随潮流

方向的改变而改变。

(5) 低浓度 (10^{-7} g/ml) 连续排放时,不能形成色带,距排放点 300m 远,荧光计就测不出示踪剂,这说明 300m 以外海域已不受污染。这种低浓度排放比较安全。

(6) 色带在垂直方向也有一定发展(图 6),在 0—5m 层,由 10^{-7} 降至 10^{-9} g/ml,浓度下降很快。5m 层以下,浓度稍高于本底水平。

3. 中心浓度随扩散时间的下降

根据以上试验资料,统计得到如下关系(图 7):

$$c_m = 7.39 \times 10^7 c_0 t^{-3.32} \quad (3)$$

$$c_m = 5.86 \times 10^8 c_0 t^{-3.61} \quad (4)$$

$$c_m = 5.53 \times 10^5 c_0 t^{-2.76} \quad (5)$$

因为稀释因子 D 定义为

$$D = \frac{c_0}{c_m} \quad (6)$$

所以(3)—(5)式又可写成稀释因子随时间的变化关系:

$$D = 1.35 \times 10^{-8} t^{3.32} \quad (3)'$$

$$D = 1.71 \times 10^{-9} t^{3.61} \quad (4)'$$

$$D = 1.81 \times 10^{-6} t^{2.76} \quad (5)'$$

其中(3)和(3)'式代表 7 号站 1984 年 5 月 5 日的关系,(4)和(4)'式代表 2 号站 6 月 5 日的关系。 c_0 为初始浓度, c_m 为任一时刻的中心浓度。

Kullenberg^[1] 和 Okubo^[2] 所得的扩散时间 t 的幂指数分别为 2.7 和 3,凌备备^[3]求得幂指数为 2。这说明不同海况、不同海区,指数的变化较大。本海区的指数大于 2.7,说明近岸涡动强烈,有利于污染物的稀释和扩散。

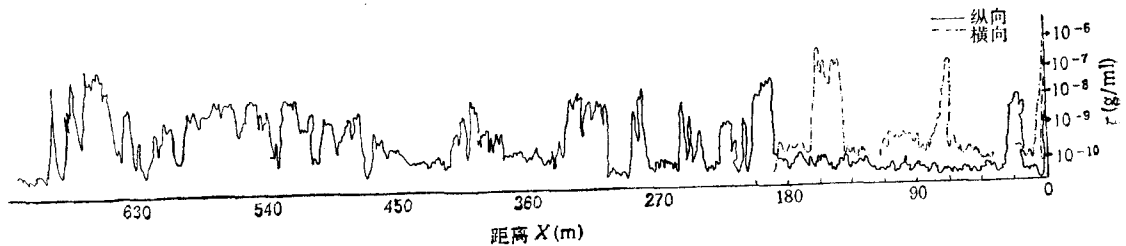


图 5 7 号站色带上的纵向和横向浓度分布曲线

Fig. 5 Longitudinal and lateral distribution curves for Rhodamine B concentration

4. 扩散方差随扩散时间的增长

根据这次的试验资料,分别求出 2 号站和 7 号站的纵向和横向方差,它们随时间不断

1) Kullenberg, G., 1974. An experimental and theoretical investigation of the turbulent diffusion in the upper layer of the sea.

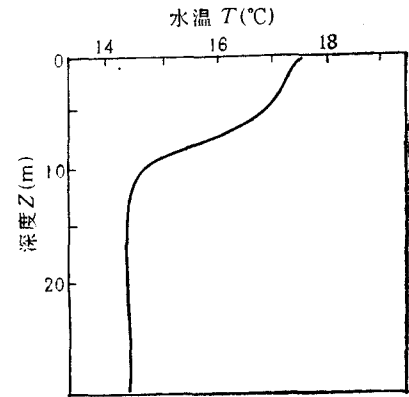


图 4 2 号站水温垂直分布

Fig. 4 Vertical temperature profile of seawater at station No. 2

增大,其关系(图 8,9)在 7 号站为

$$\begin{aligned}\sigma_x^2 &= 1.93 \times 10^{-4} t^{4.68} \\ \sigma_y &= 4.7 \times 10^{-11} t^{3.62}\end{aligned}\quad (7)$$

在 2 号站为

$$\begin{aligned}\sigma_x^2 &= 1.36 \times 10^{-6} t^{2.55} \\ \sigma_y^2 &= 2.06 \times 10^{-5} t^{2.25}\end{aligned}\quad (8)$$

说明离岸近的 7 号站比离岸远的 2 号站,其扩散方差大得多,因此扩散得较强。

5. 扩散系数随扩散尺度的增长

由于海洋中的实际扩散状况不遵从 Fick 扩散方程,其扩散系数随时间和尺度非线性增加,我们借助于随机浓度数据,求出纵向和横向扩散系数,并分析其随扩散尺度的变化关系。7 号站的水平扩散系数在 1.41×10^{-2} 至 $2.92 \times 10^2 \text{m}^2/\text{s}$ 之间,2 号站在 8.7×10^{-3} 至 $1.4 \text{m}^2/\text{s}$ 之间。两站相差一个量级。垂向扩散系数约 $10^{-2} \text{m}^2/\text{s}$ 的量级,一般比水平扩散系数小两个量级。扩散系数 (K) 和扩散尺度 (L) 具有如下关系(图 10):

$$K = 2.15 \times 10^{-6} L^{1.99} \quad (9)$$

$$K = 1.50 \times 10^{-7} L^{2.40} \quad (10)$$

$$K = 6.05 \times 10^{-7} L^{2.63} \quad (11)$$

$$K = 3.95 \times 10^{-7} L^{2.26} \quad (12)$$

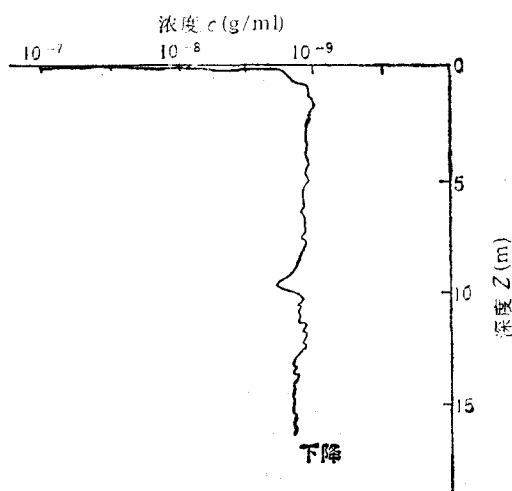


图 6 染料浓度在色带上的垂直分布

Fig. 6 Vertical distribution profiles for dye concentration in the plume

(9),(10),(11)式分别表示 6 月 4 日、5 月 21 日的资料,以(12)式作为本海区的代表性关系式,其指数达 2.26,说明近岸海域扩散能力较强。其产生原因可能是因为近岸潮流较强,切变较强,风浪和潮流造成的湍流较强,海底地形复杂,形成的小尺度涡旋较多。

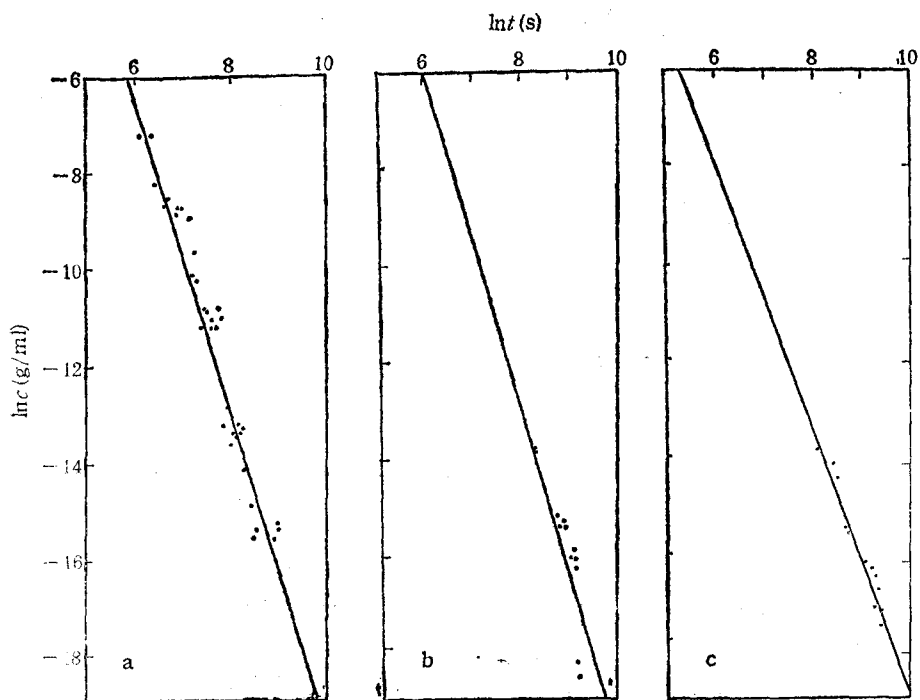


图 7 染料中心浓度随时间的下降

Fig.7 Time dependence of the dye concentration at the center of patch

a. 1984 年 5 月 5 日, 7 号站; b. 1985 年 6 月 7 日和 6 月 21 日, 7 号站; c. 1985 年 5 月 5 日, 2 号站。

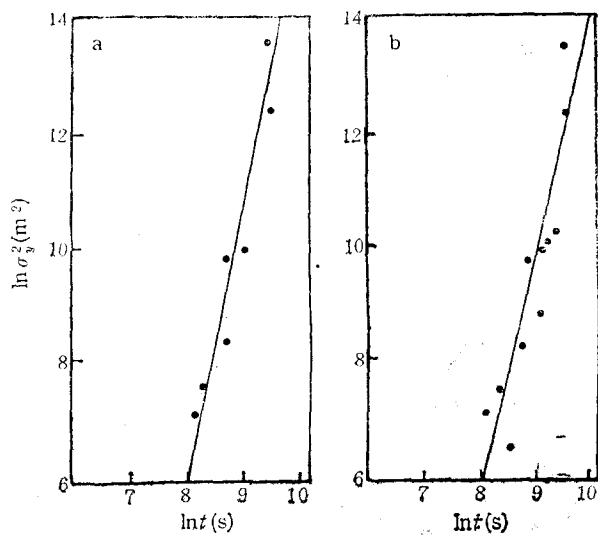


图 8 纵向扩散方差随时间的变化

Fig. 8 Time dependence of the variance for the longitudinal diffusion

a. 7 号站; b. 2 号站。

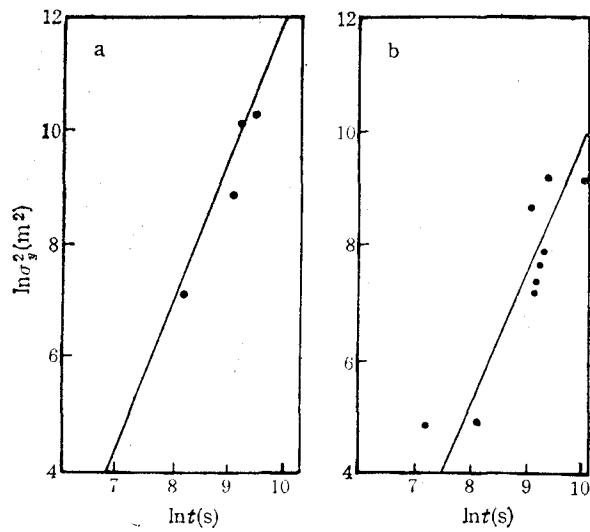


图 9 横向扩散方差随时间的变化

Fig. 9 Time dependance of the variance for the lateral diffusion
a. 7号站; b. 2号站。

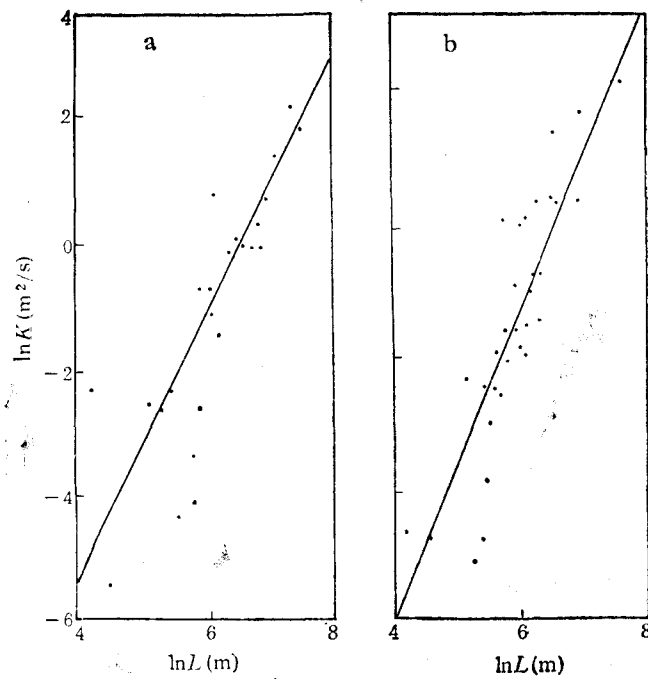


图 10 扩散系数同扩散尺度的关系

Fig. 10 Relationship between the diffusion coefficient and diffusion scale
a. 6月4日; b. 6月7日, 7号站。

二、经验扩散模式及其应用

根据试验的资料和二维扩散方程的解析解,得到二维的水平扩散模式,在7号站为

$$c_{(x,y,t)} = 7.39 \times 10^7 c_0 t^{-3.32} \exp \left\{ - \frac{(x-ut)^2}{2 \times 1.93 \times 10^{-14} t^{4.68}} - \frac{y^2}{2 \times 4.7 \times 10^{-1} t^{3.62}} \right\} \quad (13)$$

在 2 号站为

$$c_{(x,y,t)} = 5.53 \times 10^5 c_0 t^{-2.76} \exp \left\{ - \frac{(x-ut)^2}{2 \times 1.36 \times 10^{-6} t^{2.55}} - \frac{y^2}{2 \times 2.06 \times 10^{-5} t^{2.25}} \right\} \quad (14)$$

当连续点源排放时,其色带的扩散模式,在 7 号站为

$$c = \frac{q}{2\pi u \times 5 \times 10^{-4} \sigma_x^2} \exp \left\{ - \frac{x}{\sigma_x^2} (r-x) \right\} \quad (15)$$

$$r = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$$

其中 q 为排放速率 (g/s); u 为海流速度; σ_x^2 为 x 向扩散方差,在本海区约等于 10^5m^2 。当色带很长, x 接近 r 时,(15)式可转换为

$$c = \frac{q}{2\pi u \times 5 \times 10^{-4} \sigma_x^2} \exp \left\{ - \frac{y^2 + z^2}{2\sigma_x^2} \right\} \quad (15')$$

假定浓度相差 40% 为准确的,那么用(13),(14)和(15)式检验,其精度可达 90%。

在海洋环境保护中,污染物的消失时间 t_p 和扩散范围是人们最为关注的问题之一。当污染物排入海中后,逐渐扩散、稀释,最后缩成一点而消失。根据(13),(14)和(15)式,可以推出污染消失时间 t_p ,在 7 号站为

$$t_p = 2.34 \times 10^2 \left(\frac{c_0}{c_s} \right)^{1/3.32} \quad (16)$$

在 2 号站为

$$t_p = 1.20 \times 10^2 \left(\frac{c_0}{c_s} \right)^{1/2.76} \quad (17)$$

其中 t_p 为污染物消失时间; c_0 为污染物的初始排放浓度; c_s 为水质标准浓度。

在近岸 7 号站,如果罗丹明 B 染料溶液从 10^{-2}g/ml 下降到 10^{-10}g/ml ,根据(16)式则需要扩散时间 17h;如果同位素从 10^{-12}g/ml 下降到 10^{-14}g/ml ,则需要 15min;下降到 10^{-16}g/ml ,则需要 1h,下降到 10^{-18}g/ml ,则需要 4h。

在近海 2 号站,据(17)式,对上述 4 种情况,则分别需要 26h, 11min, 56min 和 5h。

污染的范围,应是 t_p 所对应的椭圆范围。根据(13)和(14)式,污染物的椭圆包络方程,在 7 号站为

$$\frac{(x-ut_p)^2}{2 \times 1.93 \times 10^{-14} t_p^{4.68}} + \frac{y^2}{2 \times 4.7 \times 10^{-1} t_p^{3.62}} = 3.32 \ln t_p + \ln \frac{c_s}{c_0} - 18 \quad (18)$$

在 2 号站为

$$\frac{(x - ut_p)^2}{2 \times 1.36 \times 10^{-6} t_p^{2.55}} + \frac{y^2}{2 \times 2.06 \times 10^{-5} t_p^{2.25}} = 2.76 \ln t_p + \ln \frac{c_s}{c_0} - 13 \quad (19)$$

在 7 号站色带的包络方程为

$$x[(x^2 + y^2 + z^2)^{1/2} - x] \times 10^{-5} = 4.83 \times \ln \frac{c_s}{q} \quad (20)$$

根据(18)和(19)两式,当污染物浓度降低 8 个量级时,7 号站纵横扩散尺度为 $5 \times 1\text{km}$, 2 号站为 $1 \times 0.5\text{km}$; 当污染物浓度降低 4 个量级时,扩散面积在 7 号站和 2 号站均为 $100 \times 100\text{m}^2$ 左右。

三、结 语

青岛沙子口近岸海域,海流以潮流为主,潮流属于正规半日潮流,海水顺岸往复流动。在半个潮周期内,平均流速约 40cm/s ,潮流垂直切变较大,对扩散影响显著。余流以风海流为主,在秋、冬两个季节,约 15cm/s ,流向偏南,比较稳定,这对污染物有明显的输运作用。在春、夏两个季节,余流约 7cm/s ,流向不稳,输运能力比秋、冬较差。

近岸由于地形复杂,涡动对流强烈,稳定度较小, Väisälä 频率 N^2 在 10^{-3} 至 10^{-5} 的范围。夏季不出现跃层,上下混合均匀,稀释扩散能力较强。近海(2 号站)由于地形平坦,水较深,垂直涡动稍弱,夏季在 $5-10\text{m}$ 层出现明显的温跃层,污染物难于上下对流混合,近海的扩散能力比近岸稍差。

参 考 文 献

- [1] 姜太良, 1985. 污染物在海洋中输运和扩散的试验技术和方法. 黄渤海海洋 4: 79—83.
- [2] 张法高, 1980. 表层 Ekman 剪切流场中的瞬时点源扩散. 海洋与湖沼 4: 287—294.
- [3] 凌备备, 1981. 中国近海小尺度海水水平湍流扩散规律与海洋污染预报的研究. 海洋学报 1: 165—183.
- [4] Joseph, J. and H. Sendner, 1958. Über die Horizontale Diffusion im Meere. Dt. hydrogr. Z. 2: 49—77.
- [5] Okubo, A., 1962. Horizontal diffusion from an instantaneous point-source due to oceanic turbulence. Tech. Rep. Chesapeake Bay Inst. 32: 124.
- [6] Озмидов, Р. В., 1958. О расчете горизонтальной турбулентной диффузии пятен примеси в море. ДАН СССР 4: 761.

AN EMPIRICAL MODEL FOR THE DILUTION AND DIFFUSION BY SEAWATER IN THE NEAR SHORE AREA OF SHAZIKOU, QINGDAO

Jiang Tailiang, Liu Guangzhang
(First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao)

Wang Hongsheng and Sun Peiquan
(Department of Radioactive Chemistry, Navy Headquarters, Beijing)

ABSTRACT

A series of *in-situ* tracer experiments were made in Shazikou near-shore area in 1984 and 1985 using a towed-fluorometry, aerial-photography and land-based locating technique. Pollutants were discharged in various ways in the experiments, including instantaneous and continuous discharges with high (10^{-7} g/ml) and low (10^{-9} g/ml) concentrations to the near-shore as well as the offshore. In the case of instantaneous discharge, irregular elliptical patches appeared with fast diffusion along the tidal current (longitudinal direction) and slow diffusion in the direction perpendicular to the current (lateral). The patch translated with the current with an average velocity of about 40 cm/s, the horizontal diffusion coefficient ranged from 8.71×10^{-3} to 2.92×10 m²/s, while that in the vertical direction was about 10^{-3} m²/s, two orders of magnitude less than the former. The horizontal diffusion coefficient for the near-shore discharge was one order of magnitude greater than that for the offshore discharge. For the continuous discharge with high concentration (10^{-3} g/ml), a slim plume with a width of about 100—300 meters appeared and came into equilibrium when the plume became 4 kilometers long. The concentration in the lateral section is normal with a maximum of about 10^{-8} g/ml at the center of the plume. For the continuous discharge with low concentration, no plume was formed and no trace of the pollutant could be found 300 meters away from the source. Therefore, this is a safe method for discharging pollutant.

The concentration at the center of the patch decreased with the time raised to a negative power of 2.76. The variance for the longitudinal diffusion increased with the time raised to a positive power of 2.55. The diffusion coefficient increased with the diffusion scale raised to the power of 2.66.

At No. 2 station in the offshore area where the water depth was a little more than 20 meters, a stronger thermocline existed at the layer of 5—10 meters, which obstructed as a barrier the vertical diffusion of the pollutant. An empirical model for the diffusion by the near-shore seawater was finally obtained and the duration of the pollution as well as its scope were estimated in this paper.