

## 石臼港污染物三维扩散系数的计算\*

张法高 王文素 李培泉 朱兰部

(中国科学院海洋研究所, 青岛)

朱 沛

(中国交通部环境监测站, 北京)

收稿日期 1989年6月3日

关键词 石臼港, 扩散系数

**提要** 根据石臼港罗丹明B和大红颜料扩散实验结果以及三维剪流扩散解析解<sup>[1]</sup>, 计算了石臼港污染物(点源)三维扩散的垂直、横向和纵向扩散系数, 它们分别为( $\text{cm}^2/\text{s}$ ):  $2.0$ ,  $1.4 \times 10^3$ ,  $1.4 \times 10^4$ 。连续源扩散系数与点源纵向扩散系数非常接近, 量值为( $\text{cm}^2/\text{s}$ ):  $1.5 \times 10^4$ 。

扩散系数一般是时间和空间的函数, 准确地确定是相当困难的。目前国内一般都将三维问题作二维对待, 而且水平扩散系数一般认为是各向同性的常数。但由于实际问题有着明显的空间不均匀性, 所以这样处理与实际差别较大。

通常计算扩散系数的方法, 一是利用浓度场计算, 二是由流场资料计算。由于后一种方法需要连续测流资料, 在实际工作中有一定的困难。我们采用第一种方法, 根据1988年7月朱沛和李培泉主持进行的石臼港罗丹明点源扩散实验和连续源扩散实验的观测资料, 分别计算了三维扩散系数。供计算石臼港污染物扩散和环境容量之用。

### I. 点源实验扩散系数的计算方法

由于在海洋中除了靠海岸狭带和锋区以外, 流场的水平梯度比垂直梯度小得多。因此, 在石臼港颜料扩散实验那样小的水平尺度范围内, 忽略流速的水平不均匀性, 取 $y$ 轴沿主流方向, 则平均流场为如下形式:

$$u = 0 \quad (1)$$

$$v = v(z) \quad (2)$$

$$w = 0 \quad (3)$$

$x$ 为横向坐标,  $y$ 为纵向坐标,  $z$ 为垂向坐标。 $u$ ,  $v$ ,  $w$ 分别为横向、纵向、垂向的平均速率, 则扩散方程为:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + V \frac{\partial \phi}{\partial y} = K \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + M \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + N \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \quad (4)$$

\* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第1657号。承蒙康兴伦同志审阅原稿, 戚建华和杜涓山同志绘图, 特此致谢。

其中,  $\phi$  为颜料浓度,  $K, M, N$  分别为横向, 纵向与垂向的扩散系数。

在实验区域内, 假设  $K, M, N$  分别为常数。由于在 10m 以浅的水域, 流速沿垂线大致呈线性分布,

$$V = V_0(H - z)/H \quad (5)$$

其中,  $H$  为水深,  $V_0$  为表面流速。

$$\partial V / \partial z = -V_0/H \quad (6)$$

作坐标交换, 令  $x = x, \eta = y - V_0(H - z)/H, z = z, t = t$ 。则方程(4)转化为:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{K \partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{(M + V_0^2 t^2 N / H^2) \partial^2 \phi}{\partial \eta^2} + \frac{(2V_0 t N / H) \partial^2 \phi}{\partial \eta \partial z} + \frac{N \partial^2 \phi}{\partial z^2} \quad (7)$$

从颜料扩散实验记录中可见, 颜料未到达海底, 故可作无限深海水近似。与文献[1]的浓度方程解析解比较可得浓度解式为

$$\phi = \frac{2C}{8(\pi t)^{3/2}(KMN)^{1/2} \left(1 + \frac{1}{12} \frac{V_0^2}{H^2} t^2 \frac{N}{M}\right)^{1/2}} \exp \left\{ -\frac{x^2}{4Kt} - \frac{\left(y - V_0 t + \frac{1}{2} \frac{V_0}{H} V_0 t\right)^2}{4Mt \left(1 + \frac{1}{12} \frac{V_0^2}{H^2} t^2 \frac{N}{M}\right)} - \frac{z^2}{4Nt} \right\} \quad (8)$$

其中  $C$  为源强度。

由(8)式可知, 等浓度线为一椭球,

$$\text{横向半轴为: } l = \sqrt{2Kt} \quad (9)$$

$$\text{纵向半轴为: } p = \sqrt{2Mt(1 + V_0^2 t^2 N) / (12H^2 M)} \quad (10)$$

由(8)式可得, 表面最高浓度点处的垂向浓度分布近似为:

$$F = Q \exp[-z^2 / (4Nt)] \quad (11)$$

其中

$$Q = \frac{2C}{8(\pi t)^{3/2}(KMN)^{1/2} \left(1 + \frac{1}{12} \frac{V_0^2}{H^2} t^2 \frac{N}{M}\right)^{1/2}} \quad (12)$$

由(9)式得到横向扩散系数的表达式

$$K = l^2 / (2t) \quad (13)$$

由(11)式得到垂向扩散系数的表达式

$$N = (Z_1^2 - Z_2^2) / [4t \ln(F_1 / F_2)] \quad (14)$$

将  $N$  代入(10)式, 得到纵向扩散系数的表达式

$$M = P^2 / (2t) - (V_0^2 t^2 N) / (12H^2) \quad (15)$$

根据实验数据, 分别计算出三个方向的一组扩散系数, 然后进行算术平均, 就得到了最终结果。

## II. 计算结果

我们根据 1988 年 7 月 20 日—25 日在石臼港做的颜料投放实验进行了计算。

### 1.1. 横向扩散系数 $K$

由(13)式得到横向扩散系数  $K$ , 见表 1。

表 1 横向扩散系数  $K$  的计算  
Tab. 1 Lateral diffusion coefficient  $K$

记录时刻 $t_n$ (时:分)	时间间隔 $t$ (min)	半轴 $l$ (m)	横向扩散系数 $K$ ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )
14:46	21	20	1 587
14:50	25	21	1 470
14:58	33	21	1 114
15:00	35	22	1 152
15:10	45	25	1 157
15:15	50	30	1 500
算术平均值			1 373

注: 颜料投放时刻  $t_0$  为 1988 年 7 月 20 日 14 时 25 分。

### II.2. 垂向扩散系数 $N$

由(14)式计算出垂向扩散系数  $N$ , 见表 2。

表 2 垂向扩散系数  $N$  的计算  
Tab. 2 Vertical diffusion coefficient  $N$

颜料投放时刻 $T_0$ (月、日 时:分)	记录时刻 $t_n$ (时:分)	时间 $t$ (min)	深度 1 $Z_1$ (m)	深度 2 $Z_2$ (m)	浓度 1 $\phi_1$ (mg/L)	浓度 2 $\phi_2$ (mg/L)	垂向扩散系数 $N$ ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )
7.20 下午 14:25	15:50	85	0	4	$2 \times 10^{-8}$	$1 \times 10^{-10}$	1.5
7.22 上午 9:36	10:22	46	0	4	$2 \times 10^{-7}$	$5 \times 10^{-10}$	2.4
7.22 上午 12:20	13:30	70	0	4.5	$1 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-10}$	1.7
7.22 下午 13:41	14:45	68	0	5	$5 \times 10^{-8}$	$1 \times 10^{-10}$	2.5
算术平均值							2.0

### II.3. 纵向扩散系数 $M$

在计算出  $N$  之后, 根据(15)式可以计算出纵向扩散系数  $M$ , 见表 3。

原始资料为 1988 年 7 月 22 日上午的颜料扩散实验数据。

表 3 纵向扩散系数  $M$  的计算  
Tab. 3 Longitudinal diffusion coefficient  $M$

颜料投放时刻 $T_0$ (时:分)	记录时刻 $T$ (时:分)	时间 $t$ (min)	最大流速 $v$ (cm/s)	水深 $H$ (m)	纵向半轴 $\rho$ (m)	垂向扩散系数 $N$ ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )	纵向扩散系数 $M$ ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )
9:36	10:45	69	26	8	112.5	2.0	12268
9:36	10:54	78	26	8	135	2.0	15615
算术平均值							13942

### III. 连续源实验扩散系数的计算

在连续源实验中, 假设在水平面上, 扩散是各向同性的。

据航空观测,连续源扩散的范围为<sup>[2]</sup>:

$$\text{宽度: } W = 2B / [(2\pi e)^{1/2} u C_b]; \text{ 长度: } L = B^2 / (4\pi K u C_b) \quad (16)$$

其中,  $B$  为颜料投放速率,  $L$  为海水流速,  $C_b$  为边界浓度,  $e$  为自然对数底数(2.718),  $K$  为水平扩散系数。第一种方法, 可以利用(17)式直接求扩散系数  $K$ , 由于投放速率难以确定, 因此有一定的困难。第二种方法是利用(16)和(17)式消去  $B$ , 得到扩散系数的表达式为:

$$K = (euW^2) / (8L) \quad (18)$$

表 4 连续源扩散系数

Tab. 4 The diffusion coefficient of continuous source

记录时刻 $T$ (时:分)	宽度 $W$ (m)	长度 $L$ (m)	流速 $u$ (cm/s)	水平扩散系数 $K$ (cm <sup>2</sup> /s)
15:20	150	1 820	26	11 049
15:32	150	2 020	26	9 846
15:40	200	2 220	26	15 826
16:00	250	2 500	26	21 958
算术平均值				$\approx 1.5 \times 10^4$

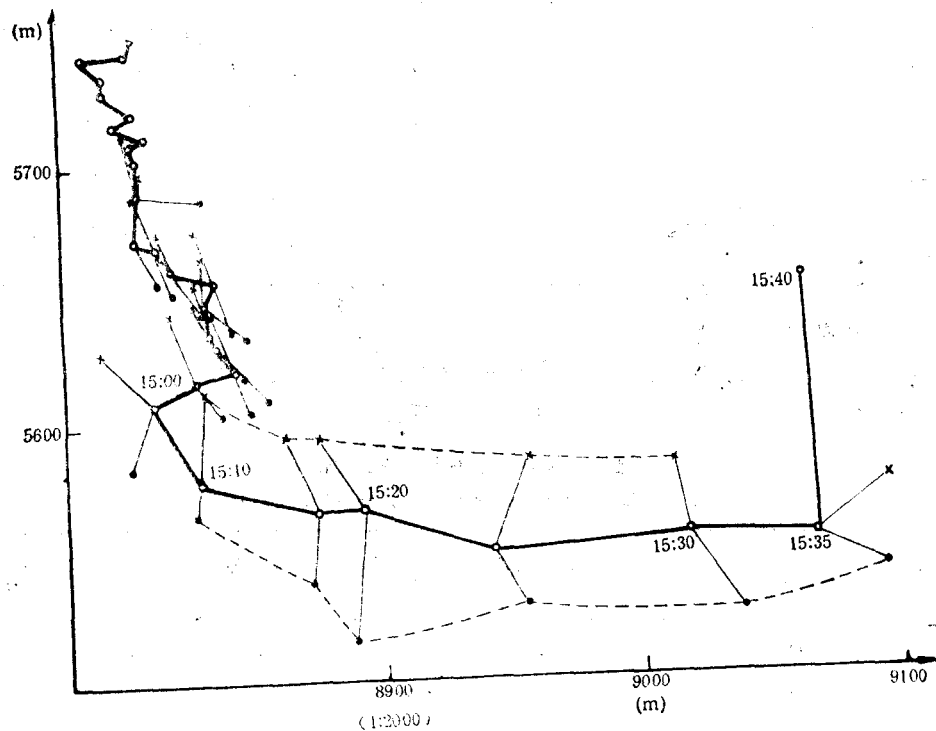


图 1 瞬时点源扩散实验颜料团分布

(1988年7月22日)

o—o中心线, ---边缘线

Fig. 1 The dye distribution of instantaneous point source diffusion experiment (July 22, 1988)

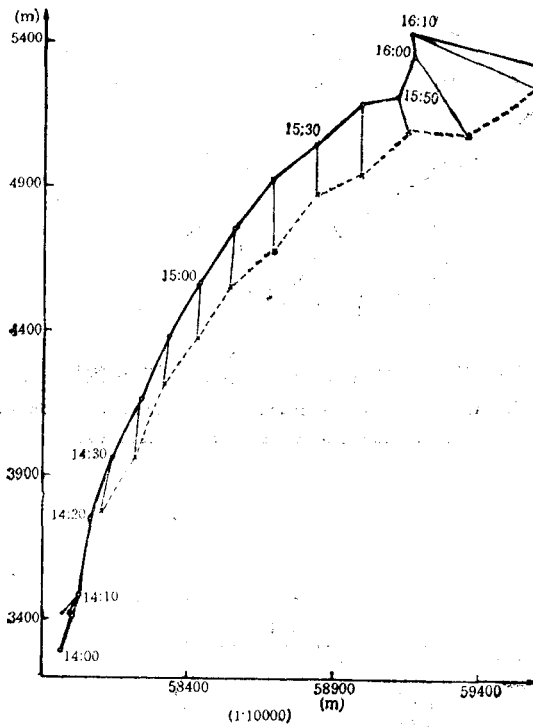


图 2 连续源扩散实验羽状颜料团分布  
(1988 年 7 月 22 日)

○—○中心线, ---边缘线 注: 只标出一侧边缘线

Fig. 2 The dry plume distribution of continuous source diffusion experiment

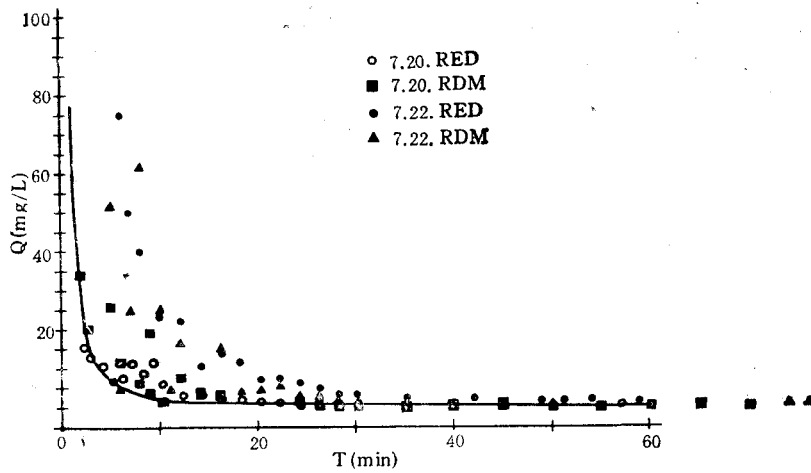


图 3 瞬时点源扩散表面最高浓度随时间的变化  
——(12)式的  $Q$  值

Fig. 3 The maximum concentration on surface of instantaneous point source diffusion experiment

我们根据(18)式计算了  $K$ , 结果见表 4。原始资料为 1988 年 7 月 22 日的连续源扩散实验的记录数据。

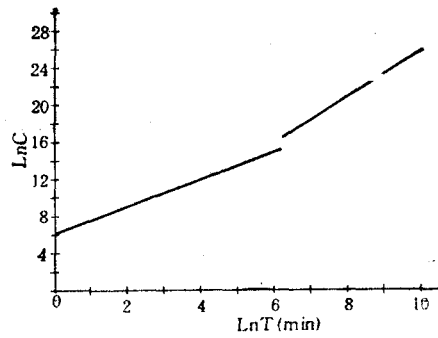


图4 瞬时点源表面最高浓度随时间变化的理论曲线

Fig. 4 The theory curve of maximum concentration on surface of instantaneous point source diffusion

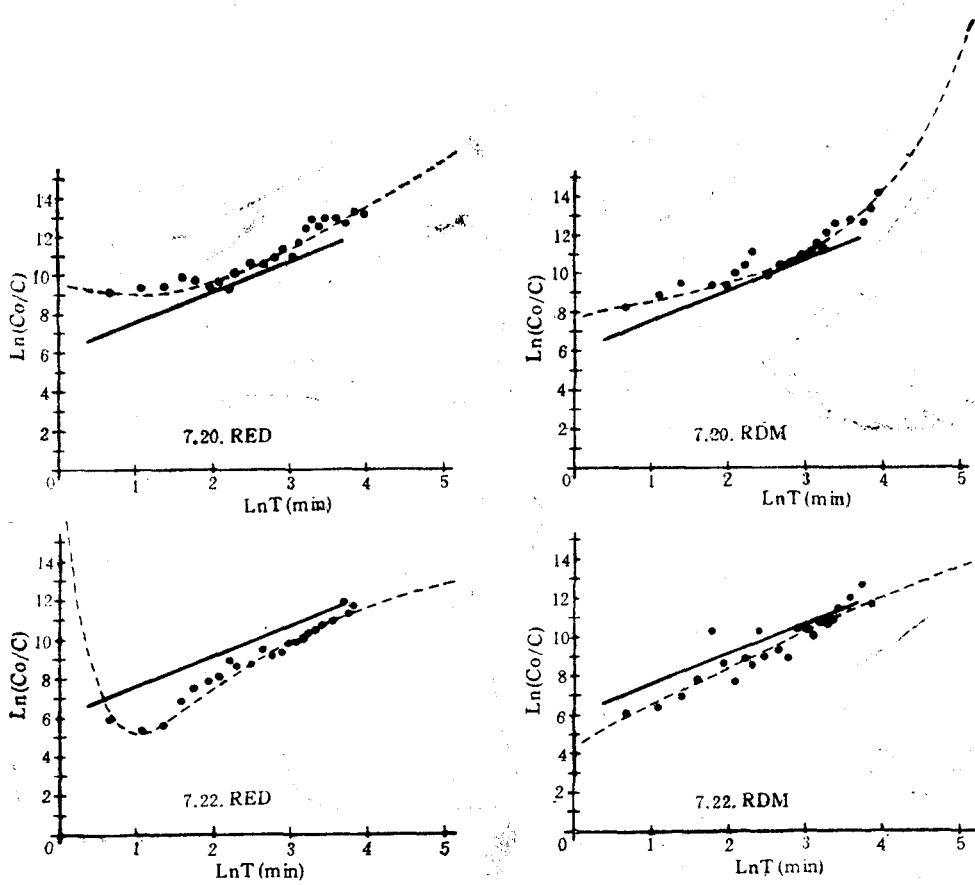


图5 稀释因子随时间的变化(4个图表示石臼港内4个不同实验点)

----回归曲线; ——理论解曲线

Fig. 5 The dilution factor versus time

---- the regression curve —— the theory curve

由计算结果可以看到,根据连续源扩散实验所计算的扩散系数与点源扩散实验的纵向扩散系数非常接近(见图1—6)。

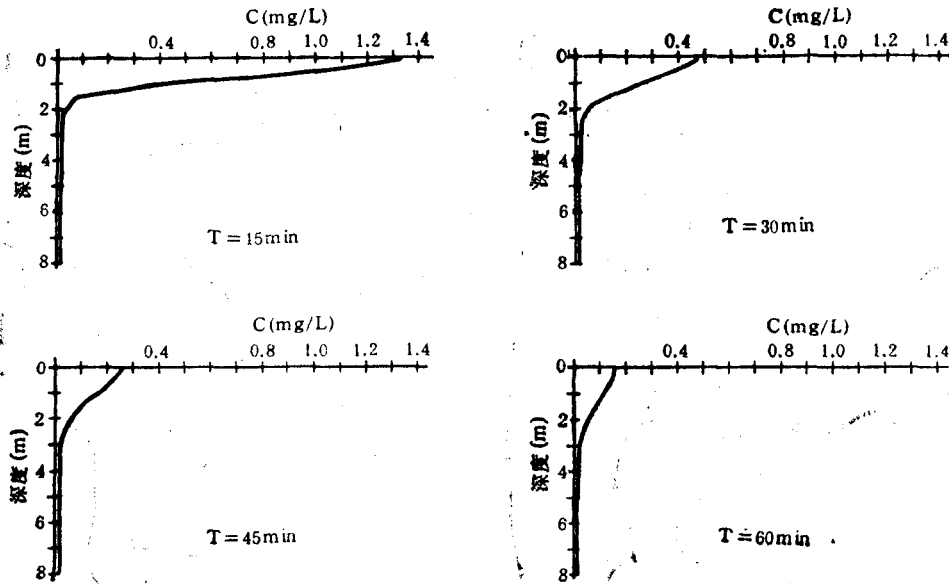


图 6 浓度随深度的变化

Fig. 6 The concentration distribution versus depth

## 参 考 文 献

- [1] 张法高, 1980. 表层 Ekman 剪切流场中的瞬时点源扩散. 海洋与湖沼 11(4): 287-289.  
 [2] Murray, Stephen P., 1972. Turbulent diffusion of oil in the ocean. *Limnology and Oceanography* 17: 651-660.

## 3-D DIFFUSION COEFFICIENT COMPUTATION FOR SHIJU HARBOUR

Zhang Fagao, Wang Wensu, Li Peiquan and Zhu Lanbu  
 (Institute of Oceanology, Academia Sinica, Qingdao)

Zhu Pei  
 (Environment Monitoring Agency, Ministry of Communication, Beijing)

Received: June 3, 1989

Key Words: Shijiu harbour, Diffusion coefficient

## Abstract

3-D diffusion coefficients for Shijiu Harbour are computed based on the analytical solution for a 3-D instantaneous point-source shear diffusion (Zhang Fagao, 1980) and the data of Rhodamine-B and red dye diffusion experiments in this area. The computed values of the diffusion coefficients for an instantaneous point-source in the vertical, the lateral and the longitudinal direction are 2.0,  $1.4 \times 10^3$  and  $1.4 \times 10^4$  cm<sup>2</sup>/s respectively.

The computed diffusion coefficient for a continuous source is  $1.5 \times 10^4$  cm<sup>2</sup>/s, almost equal to that of the longitudinal diffusion coefficient for point-source as above mentioned.