

中国近岸海区小尺度水平湍流 扩散规律的研究*

凌 备 备

(哈尔滨船舶工程学院)

随着现代工业(包括原子工业、核舰船)的发展,海洋污染问题已经引起了广泛的注意。确定各种污染物质元素(核素)在海水中的最大允许浓度以及特定海区中海水的有效稀释能力,是海洋污染研究中的两个重要课题¹⁾。其中关于海洋的有效稀释能力估计,则与海洋的湍流扩散问题有关。

由于海洋湍流扩散过程本身的随机性,加之影响湍流扩散的因素又很多,例如季节、海区、水文气象条件等诸种因素,都会对它发生影响;而且这些因素间互相制约,错综复杂。因此,当今研究工作虽然很多,但无论从实验观测或理论研究结果来说,大多与特定的条件有关,至今还没有一个比较满意的统一理论^[2]。我国沿海湍流扩散的基本规律,也还需要进一步的研究。

本文先从一个统计理论模型出发,讨论海水湍流扩散场的机制;然后在分析总结了南海、东海、黄海和渤海等8个不同海区的30次实验观测数据以及计算了基本扩散参数的基础上,对我国沿海的水平湍流扩散基本规律,进行了研究,得出一些初步结果。最后再作几点简单讨论。

一、理论考虑

1. 统计模型

对于瞬时投放点源的海水水平湍流扩散,可以采用如下的统计模型^[1]。

首先考虑被扩散物质质点在海水湍流场中的水平扩散运动,是个随机过程,并假定它在统计结构上满足高斯误差分布律;但这种质点的统计运动,与分子扩散不同,其特性与表征被扩散物质云团整体几何性质的尺度有关。由于扩散云团尺度不断增大,所以我们假定扩散系数、速度标准偏差等扩散特征量,一般都是时间的函数。因为只有与云团尺度相当或更小的那些较小尺度的海水涡动,才能对投放液团的湍流扩散作出贡献;而那些尺度相对较大的涡动(如有些问题中所研究的海流),则对扩散不起直接作用,只使投放液云团产生一个整体的定向漂移运动。这时,投放液团在以高斯律向四周播散的同时,还将随海水的有效平动作定向漂移。

* 本文曾先后在1979年3月7日—3月11日召开的中国造船学会耐波性会议以及1979年8月7日—8月12日召开的中国海洋工程学会第一届年会上报告过。

本刊编辑部收到稿件日期:1979年1月20日。

1) 凌备备,1975。关于放射性废液的海洋排放问题(未刊稿)。

令坐标原点为瞬时投放点;时间 t 由投放时刻起算; x 轴与海水有效平动速度 \mathbf{U} 方向一致, y 轴在水平面内与 x 轴垂直, z 轴与 $x-y$ 平面垂直朝下。按上述考虑, 投放物质在水平方向上的面浓度 $P(x, y, t)$ 应取如下分布:

$$P(x, y, t) = P_m(x_0, y_0, t) e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{(x-x_0)^2}{l_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{l_y^2} \right]}, \quad (1)$$

其中 (x_0, y_0) 为云团中心的坐标,

$$\begin{cases} x_0 = Ut, \\ y_0 = 0, \end{cases} \quad (2)^0$$

而 P_m 为云团中心(峰值)浓度。 l_x 及 l_y 分别为沿 x 及 y 轴方向上扩散距离的平均标准偏差 (l_x, l_y 皆非负), 它们表征了扩散质点离开云团中心 (x_0, y_0) 的一种平均距离, 因而可以代表云团的某种平均线度。此外, 按上述考虑, 沿 x 及 y 向的扩散速度方差 σ_u^2 及 σ_v^2 一般皆为 t 的函数, 我们设其有这样的幂次方关系:

$$\begin{cases} \sigma_u^2 = \frac{m^2}{4} \sigma_U^m t^{m-2}, \\ \sigma_v^2 = \frac{m^2}{4} \sigma_V^m t^{m-2}. \end{cases} \quad (3)$$

式中 m 为待定的大于零的无量纲参数, σ_U 及 σ_V 为另两个不随时间 t 变化的大于零的扩散参数, 于是, 按照 σ_u 与 l_x 以及 σ_v 与 l_y 的对应关系并注意式 (3) 后, 有

$$\begin{cases} l_x^2 = \sigma_U^m t^m, \\ l_y^2 = \sigma_V^m t^m. \end{cases} \quad (4)$$

式 (1) 中的 P_m , 可由投放物物质或放射性强度总量 Q 给出

$$P_m = Q / 2\pi (\sigma_U \sigma_V)^{\frac{m}{2}} t^m. \quad (5)$$

方程 (1), (2), (4), (5), 就是我们瞬时点源的海水水平湍流扩散的统计模型。为简化问题, 这个模型中不考虑沉降、投放物为放射性物质时的衰变效应等因素。而海水湍流场扩散的基本特征则已用 m, σ_U 及 σ_V 三个参量概括。

2. 模型的导出与湍流扩散规律

为阐明上述模型所反映的湍流场物理机制, 我们从一个简单的扩散方程出发进行讨论。假设点源投放后海水中任一点附近投放物质面浓度 P 的增长率 $\partial P / \partial t$ 由两种原因所引起: 一为海水的有效定向平动, 其贡献为 $-\nabla \cdot (P\mathbf{U})$; 二为海水的湍流运动。设湍流场一点附近的输运量与该点附近的投放物质面浓度梯度成正比, 方向由高浓度处指向低浓度处, 则此项贡献可写作 $\nabla \cdot (\mathbf{K} \cdot \nabla P)$ 。其中 \mathbf{K} 为湍流扩散系数张量, 它代表了湍流扩散场的特性。于是有方程:

$$\partial P / \partial t = \nabla \cdot (\mathbf{K} \cdot \nabla P) - \nabla \cdot (P\mathbf{U}). \quad (6)$$

对于二维水平扩散,

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

现在, 我们对湍流场再作些假定。设坐标取法同前一样, 假定湍流场是均匀的, \mathbf{K} 与

1) 为简化问题而并不失一般性, 这里假设 U 为常量。

空间坐标 x, y 无关; 而且有一定的对称性, 即沿 x 方向的湍流输只与浓度梯度的 x 方向分量 $\partial P/\partial x$ 有关, 与 y 方向分量 $\partial P/\partial y$ 无关。同样, y 方向的湍流输运只与 $\partial P/\partial y$ 有关。这时, $K_{xy} = K_{yx} = 0$, 而式(6)即简化为

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -U \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial P}{\partial y} \right). \quad (8)$$

这就是熟知的瞬时点源扩散方程。但是我们在前面已经指出, 海水湍流扩散与云团尺度有关, 因而与时间有关。于是式(8)中的 K_{xx} 及 K_{yy} 应为 t 的函数。

对于开阔海域中的点源扩散, 方程(8)的边值条件可取作: 无穷远处 $P \rightarrow 0$, 且其趋于零的速度要比 $1/r^2$ 的快。而初值条件, 则可由点源投放的物质或放射性总量给出。

容易证明在上述边值、初值条件下, 方程(8)有(1)的解, 并且 K_{xx}, K_{yy} 与 t 及 l_x, l_y 间必须满足如下关系:

$$\begin{cases} K_{xx} = \frac{m}{2} \sigma_U^m t^{m-1}, \\ K_{yy} = \frac{m}{2} \sigma_V^m t^{m-1}. \end{cases} \quad (9)$$

以及

$$\begin{cases} K_{xx} = \frac{m}{2} \sigma_U l_x^{\frac{2(m-1)}{m}}, \\ K_{yy} = \frac{m}{2} \sigma_V l_y^{\frac{2(m-1)}{m}}. \end{cases} \quad (10)$$

(9), (10) 两式, 即为本文采用的湍流扩散模型(1)–(5)中海水水平湍流扩散系数所需满足的基本扩散规律形式。

如上所说, 湍流扩散的具体特征是由 m, σ_U 及 σ_V 来表征的; 而且 m 只能取大于零的值。这是因为物理上要求瞬时点源扩散问题中等浓度椭圆

$$\frac{(x - x_0)^2}{l_x^2} + \frac{(y - y_0)^2}{l_y^2} = 1 \quad (11)$$

的两个半轴皆应随 t 而增大, 应有 $l_x > 0$ 及 $l_y > 0$, 故由式(3)或(4), 即须有 $m > 0$ 。

当 m 分别取 1, 2 及 3 的值时, l_x, σ_u 及 K_{xx} 的值见下表所示:

m	l_x	σ_u	K_{xx}
1	$\sigma_U^2 t^{1/2}$	$\frac{1}{2} \sigma_U^2 t^{-1/2}$	$\frac{1}{2} \sigma_U$
2	$\sigma_U t$	σ_U	$\sigma_U^2 t = \sigma_U l_x$
3	$\sigma_U^2 t^{3/2}$	$\frac{3}{2} \sigma_U^2 t^{1/2}$	$\frac{3}{2} \sigma_U^3 t^2 = \frac{3}{2} \sigma_U l_x^{4/3}$

由表可知, 当 $m = 1$ 时, 扩散系数 K_{xx} 不随时间而变, 问题还原为 Fick 的分子扩散。这时, σ_U 就具有扩散系数 K_{xx} 的意义, 且 σ_u 将随 t 变小。当 $m = 2$ 时, 扩散速度 σ_u 不随时间而变; σ_U 还原成为扩散速度; 而且扩散系数随 t 而变且与投放液云团的线度有直线性关系。当 $m = 3$ 时, 扩散速度 σ_u 将随 t 增大; 扩散系数与投放液云团线度的 $4/3$ 次方

成正比,即有熟知的“4/3次方定律”。 $m = 2$ 是扩散速度 σ_u 随时间增大或减小的一个“临界点”。 y 方向的情况完全类似,这里从略。

这样,利用式(1)–(5)给出的湍流扩散模型,当由海上实验观测数据定出 m, σ_u 及 σ_v 以后,就可得到当地海水水平湍流扩散的具体规律。

二、实验分析

从上述式(1)–(5)的模型出发,我们对南海、东海、黄海和渤海沿海8个不同海区、在不同季节和水文气象条件下所作的30次实验观测的原始数据,作了比较系统的整理并用迴归分析方法确定了有关的扩散参数。现分述如下。

1. 实验简述

海上实验的方法与具体过程,详见中国科学院海洋研究所¹⁾、国家海洋局第三研究所²⁾以及国家海洋局第一研究所³⁾的有关报告。其主要为:用10–20毫居里的 Co^{60} 放射性硝酸溶液,配制成60升左右的投放试验液体,然后从实验船上倾倒入预定海区表层海水中作自由的瞬时投放。为便于观测,投放液体中还加入了适量的大红染料或若丹明B。投入海水中的液团,随即一面飘移一面扩散。此时,投入备用的小艇即跟踪这红色水体,按不同时刻对表层水体中心峰值浓度附近采样。之后,在实验室中作 r 计数测定,得到计数率与投放后时间 t 的一组数组。在海上采样的同时,对当时的风、流、涌、浪以及潮汐、水深和实验点方位等也作出观测记录。

2. 几点说明

首先,我们所取的是二维模型。这对于垂直搅混比较强烈的海区,特别是对于大多数浅海区,是基本适用的。对于相对较深的海水,可以认为垂直扩散有分层均匀的特点。因此我们可以假定在适当选用有效水深 h 值后,二维模型仍能近似应用。这样面浓度 P 与实际测量得到的体浓度 P' 之间,可有如下简单关系:

$$P' = P/h_0 \quad (12)$$

在我们的计算中,对于离岸距离小于2海里的近岸浅海区,取 h 值为5米;对于2海里到12海里左右的海区,则取 h 为10米。

其次,由于种种原因,我们只收集到峰值浓度的数据,所以尚不能得到关于 m, σ_u 及 σ_v 的全部知识。为此,作为初级近似我们再假定湍流扩散场是各向同性的,即有

$$\sigma_u = \sigma_v = \sigma, \quad (13)$$

而使问题简化为对于 m 及 σ 两个量的研究。

3. 实验结果与扩散参数的确定

我们根据每次实验所得的 (P_m, t) 数组,作出 $\log P_m - \log t$ 的迴归直线关系图(见附图1–8),并计算了每一迴归直线的相关系数 r 以及扩散参数 m 与 σ 值。各次实验所得结果及其相应的水文气象要素,见附表1及附表2。现分析说明如下:

(1) 长江口海区:长江口与东海相连,是个典型的河口区。实验点离开上海市浦东

1) 中国科学院海洋研究所,1969。海水放射性稀释因子的测定。

2) 国家海洋局第三研究所,1975。第二航次放射性稀释因子实验报告。

3) 国家海洋局第一研究所,1977。海水稀释扩散实验报告。

海岸约 1600 米；该地水深约 11 米。1969 年 10 月，中国科学院海洋研究所在这里进行了四次稀释实验。同位素 Co^{60} 用量分别为 10, 10, 19.5 以及 12.4 毫居里。序号编为 1#—4#。由这四次实验数据计算得到的 $\log P_m - \log t$ 回归线，见附图 1。所得回归直线的相关系数 r 值分别为 $-0.65, -0.98, -0.99$ 以及 -0.97 。实验 1# 共采样 8 次，有 8 对 P_m, t 值，而 $|r|$ 值比 $\alpha = 0.05$ 水平上显著的值 0.707 为小；这表明 $\log P_m - \log t$ 间并没有较好的线性关系。后三次的 $|r|$ 值皆与 1 十分接近，表明 $\log P_m - \log t$ 间有很好的线性关系。其中实验 1# 的 $|r|$ 值偏小，是由采样波动太大所致；其参数不再进行计算。实验 2#—4# 回

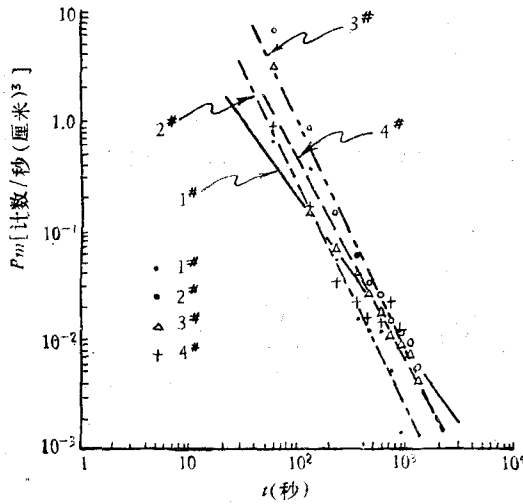


图 1 长江口海区 $\log P_m - \log t$ 回归线

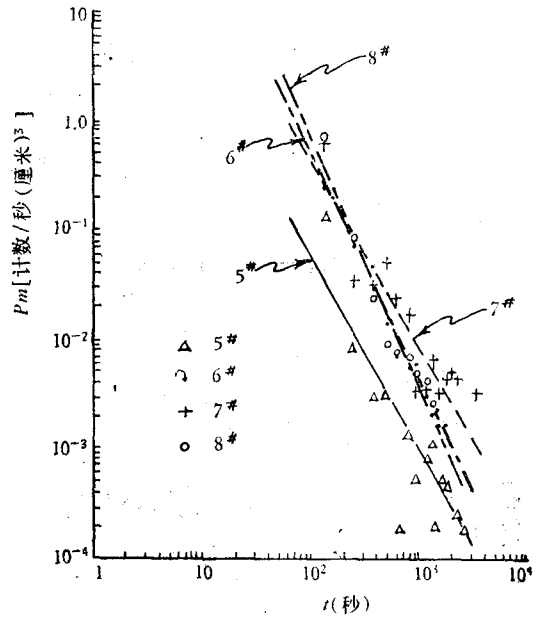


图 2 海西湾海区 $\log P_m - \log t$ 回归线

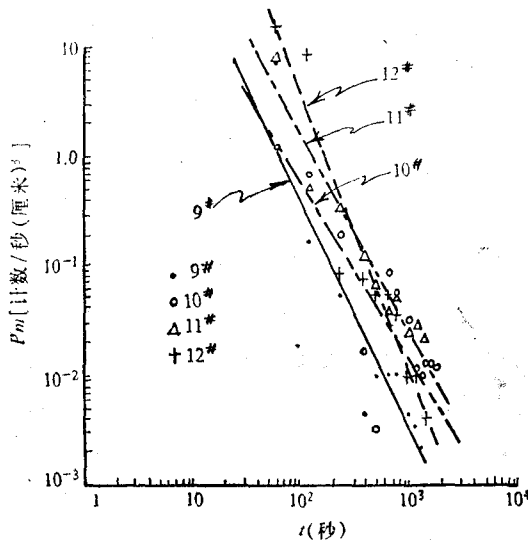


图 3 湛江湾海区 $\log P_m - \log t$ 回归线

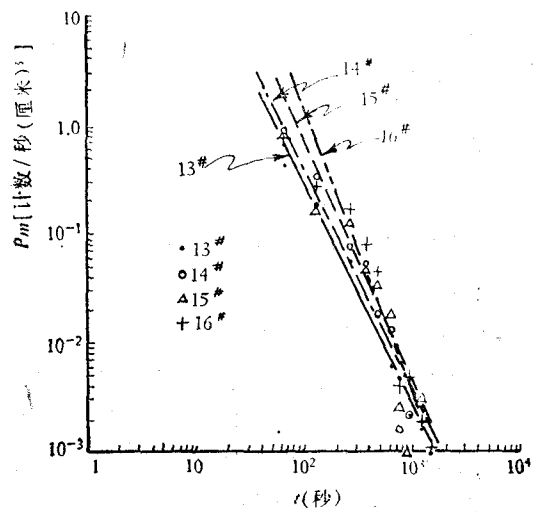
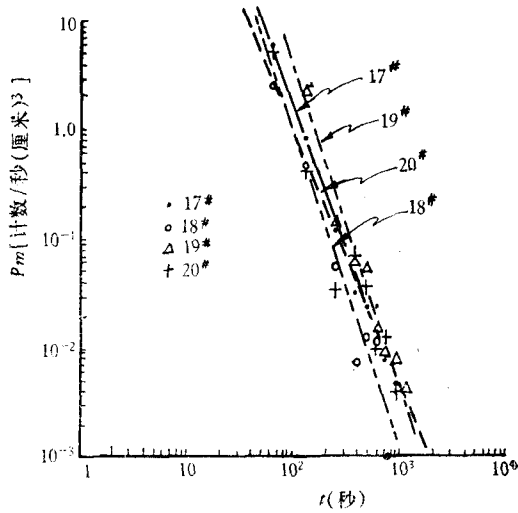
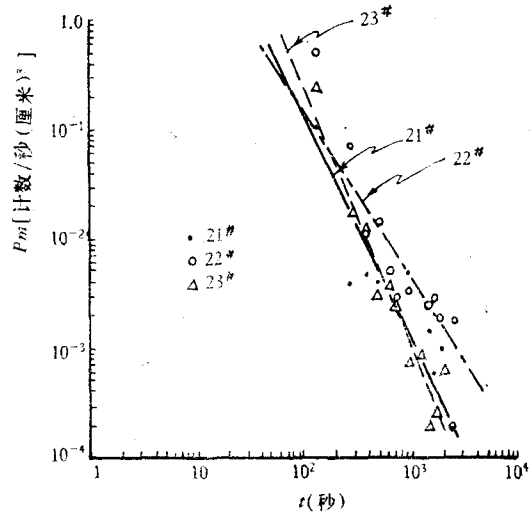
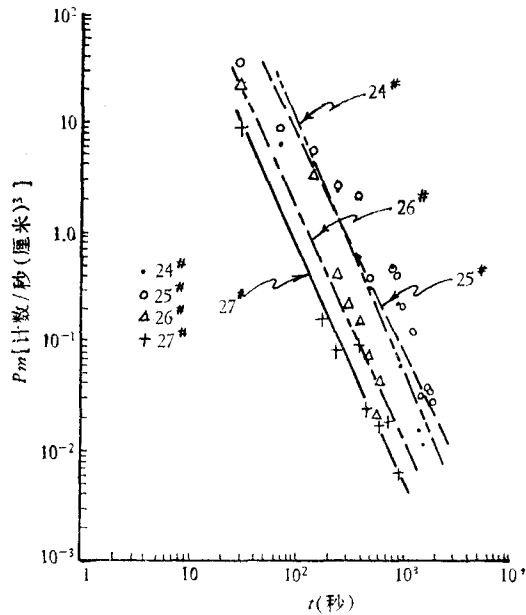
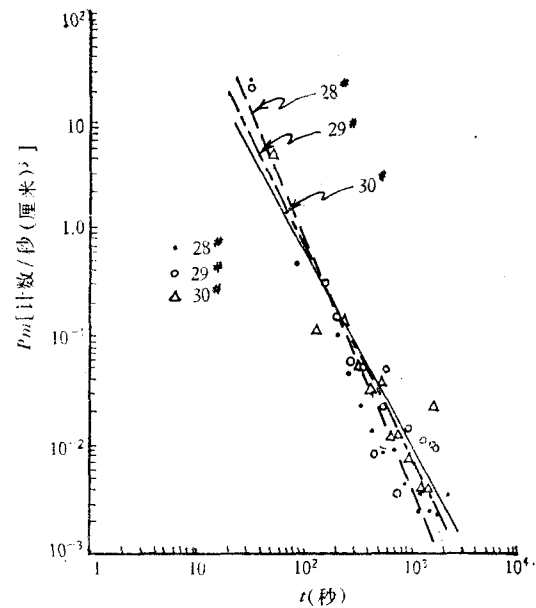


图 4 南澳岛海区 $\log P_m - \log t$ 回归线

图5 榆林海区 $\log P_m - \log t$ 回归线图6 潮连岛海区 $\log P_m - \log t$ 回归线图7 舟山海区 $\log P_m - \log t$ 回归线图8 辽东湾海区 $\log P_m - \log t$ 回归线

归直线的斜率给出的 m 值, 分别依次为 2.18, 2.17 以及 1.88。由附表 1 可知, 实验 3# 及 4# 的水文气象条件完全相同, 故可对这两次的 m 值作平均, 得 2.03 ± 0.15 。在误差范围内与实验 2# 的 2.18 相近。这表明风力在 2, 3 级, 涌浪较小而流速在 1—2.5 节时, 风、浪、涌、流诸因素对长江口水平湍流扩散不产生明显影响。根据这种分析, 我们对 2#—4# 这三个 m 值作等权重平均, 得 $\bar{m} = 2.08 \pm 0.10$ 。据此, 以 $m = 2$ 并取有效水深 h 为 5 米, 计算得到 2#—4# 的 σ 值分别依次为 1.18, 0.81 及 2.08 厘米/秒。

(2) 海西湾海区: 海西湾位于胶州湾南侧, 受外海影响较小, 水体稳定, 扩散物质的

附表 1

海区(实验时间)	序号	离岸距离 L(米)	水深 H(米)	风 (级)	浪 (级)	涌 (涌)	流速 (节)	m	-r	σ (注) (厘米/秒)
长江口 (1969.10.19—10.20)	1	1600	11	3	2	无	1	—	0.65	—
	2			3	2	无	1	2.18	0.98	1.18
	3			2	无	小	2.5	2.17	0.99	0.81
	4			2	无	小	2.5	1.88	0.97	2.08
海西湾 (1969.1.14—1.15)	5	640	5	5	小	—	0.8	—	0.59	—
	6			3	轻	—	0.6	1.81	0.96	0.89
	7			无	无	无	0.6	—	0.63	—
湛江湾 (1969.5.29—5.31)	8	2000	26	2	1	无	0.5	2.27	0.95	0.69
	9			2	1	无	0	1.39	0.83	3.54
	10			2	无	无	0.2	1.81	0.92	0.89
	11			2	1	无	0.2	2.74	0.97	0.10
南澳岛 (1969.8.28)	12	1700(离岛)	15	1	无	无	1.4	2.04	0.98	1.90
	13			1	无	无	1.4	2.02	0.72	2.12
	14	7700(离大陆)		1	无	无	0.9	2.05	0.96	1.49
	15			1	无	无	0.9	2.45	0.92	0.70
榆林 (1969.5.17)	16	4250	51	4	3	中	0.9	2.52	0.99	0.36
	17			4	3	中	0.9	2.90	0.94	0.18
	18			3	2	中	0.8	2.59	1.00	0.26
	19			3	2	中	0.8	2.36	0.95	0.35
潮连岛 (1968.11.12—11.14)	20	30000(离岛)	39	1	无	小	0.8	—	0.55	—
	21			2	无	—	0.6	1.71	0.87	1.31
	22			3	2	—	0.6	2.21	0.77	0.34

注: 榆林区 σ 按 $m = 2.5$ 计算, σ 单位为(厘米) $^{2/2.5}$ (秒) $^{-1}$ 。

附表 2

海区(实验时间)	序号	离岸距离 L(米)	水深 H(米)	风 (级)	浪高 (米)	流速 (厘米/秒)	海况	m	-r	σ (厘米/秒)
舟山 01 (1975.10.8)	24	300	26	2	0.2	52	1	2.01	0.91	0.56
舟山 04 (1975.10.11)	25	3000	15	3	0.3	18	1	1.95	~1.0	0.49
舟山 03 (1975.10.20)	26	离大陆>2海里, 离岛 700	80	4	0.5	52	2	1.83	0.82	1.03
舟山 02 (1975.10.20)	27	6000	43	3	0.5	37	2	1.93	0.96	0.80
辽东湾 II (1976.6)	28	35600	17	3		22		2.02	0.94	1.28
辽东湾 III (1976.6)	29	25300	26	4—5		25		1.84	0.90	1.56
辽东湾 IV (1976.6)	30	23000	25	4		36		1.67	0.90	2.91

移动范围也较小。1968年末到1969年初,中国科学院海洋研究所在这个海区进行了四次实验;序号编为5[#]—8[#]。实验点离开海西半岛石盆嘴大陆附近,约有640米,水深5米。实验所用放射性同位素 Co^{60} 强度前三次为9.9毫居里,实验8[#]用量为13毫居里。计算所得 $\log P_m - \log t$ 回归线,见附图2。相关系数 r 值分别依次为-0.59, -0.96, -0.63以及-0.98。第5[#], 7[#]两次,采样皆为14次,故相应的 $|r|$ 值是在 $\alpha = 0.05$ 及0.01水平上显著值之间。表明这两次实验的 $\log P_m - \log t$ 间有线性关系,但不够理想。我们不拟对它进行讨论。第6[#], 8[#]两次实验的 $|r|$ 值,表明它们各自的 $\log P_m - \log t$ 间有很好的线性关系。由该两次实验所得回归直线斜率绝对值,分别为1.81及2.30。由附表1可知,这两次实验的水文气象条件,除了8[#]的风力为无风、6[#]的为3级而外,其他条件相差不多。但8[#]的 m 值却比6[#]的大。再考虑到采样的随机性,因此我们不能作出风力对 m 有明显影响的结论。这一点,是与长江口的结果基本协调一致的。如对6[#], 8[#]两次的 m 值作平均,则有 $\bar{m} = 2.06 \pm 0.25$ 。以 $m = 2$, $h = 5$ 米,计算所得6[#], 8[#]的两个 σ 值分别为0.89及0.22厘米/秒,两者有相同的量级,平均 σ 为 0.56 ± 0.34 厘米/秒。

(3) 湛江湾海区: 湛江湾为狭长型海湾,中间最深处约有20—30米,两边大部分为几米的浅海。潮汐是往复式的全日潮。1969年5月,中国科学院海洋研究所在这里所做的四次实验,序号编为9[#]—12[#]。实验在水深26米、离特呈岛约2公里处进行。时间大都选在采样比较方便、不利于扩散的平潮前后。 Co^{60} 用量前三次均为10毫居里,12[#]为20毫居里。由实验结果计算所得 $\log P_m - \log t$ 回归线见附图3。相应的 r 值分别依次为-0.95, -0.83, -0.92及-0.97。这表明四次的 $\log P_m - \log t$ 间都有很好的线性关系。所得 m 值依次为2.27, 1.39, 1.81及2.74。由附表1,可以看出这四次实验的水文气象要素总的说都比较接近:风力皆为2级;浪三次1级,一次“无”;涌四次全“无”;流速也在0.5节以下。但所得 m 值却有一定偏差。特别是11[#], 12[#]两次,风、浪、涌几乎全同,风向、流向间夹角也都是 180° ,但 m 值也相差0.9之多。考虑各次 $|r|$ 值都与1比较接近,我们对这四次 m 值作平均,得 $\bar{m} = 2.05 \pm 0.37$ 。如仍取 $h = 5$ 米, $m = 2$,则计算所得 σ 值依次为0.69, 3.54, 0.89以及0.10厘米/秒。

(4) 南澳岛海区: 1969年夏,中国科学院海洋研究所在这里进行了四次实验;序号编为13[#]—16[#]。实验地点选在离南奥岛约1700米,离大陆海岸约7700米处,当地水深约15米。这里已有一些外海的特点。由四次实验数据计算得到的 $\log P_m - \log t$ 回归线见附图4。同位素 Co^{60} 用量除16[#]一次20毫居里外,其他三次均为10毫居里。计算所得相关系数分别依次为-0.98, -0.72, -0.96以及-0.92。除14[#]的 $|r|$ 与1偏离稍大、只在 $\alpha = 0.05$ 水平上使 $\log P_m$ 与 $\log t$ 有显著性关系外,其他三次 $|r|$ 都在0.92之上,线性关系很好。所得 m 值依次为2.04, 2.02, 2.05以及2.45。由附表1可知,四次实验风力皆为1级,无涌、无浪且流向与风向间夹角都为 135° ,水文要素的差别只在头两次流速为1.4节,后两次为0.9节。所以总的说,水文气象要素都是比较接近的。因之,我们对这四个 m 值作平均,有 $\bar{m} = 2.14 \pm 0.13$ 。考虑这里离岛不到1海里,水深15米也不算太深,故虽离大陆海岸已比2海里大,但仍可取 $h = 5$ 米。据此,并取 $m = 2$,计算所得 σ 值分别为1.90, 2.12, 1.49及0.70厘米/秒。

(5) 榆林海区: 1969年5月,中国科学院海洋研究所在这里进行的四次实验,序号

编为 17[#]—20[#]。实验地点离大陆约 4.3 公里,水深 51 米; Co⁶⁰ 投放量分别为 20, 10, 20, 10 毫居里。计算所得 $\log P_m - \log t$ 回归线见附图 5。| r | 值分别为 0.99, 0.94, 1.00 及 0.95, 与 1 非常接近或几乎相等,表明四次实验的回归线都有极好的线性关系。计算所得 m 值分别为 2.52, 2.90, 2.59 及 2.36。考虑到 17[#], 18[#] 两次实验的水文气象条件完全相同,且 | r | 值又都与 1 十分接近,故对它们的 m 值作平均,得 2.71 ± 0.19 ; 类似地,对 19[#], 20[#] 两次的 m 值作平均,有值 2.47 ± 0.12 。比较前二次与后二次的水文气象要素可知,风力由 4 级减为 2 级;浪由 3 级减为 2 级;中涌不变;流速由 0.9 节减为 0.8 节而流向、风向间夹角没变。而相应的 m 平均值也由 2.71 减为 2.47。这似乎表明对较深的外海,当风、浪、涌流增大时, m 值有增大的倾向。如取 $h = 10$ 米, $m = 2.5$, 计算所得 σ 值在厘米·克·秒制下分别为 0.36, 0.18, 0.26 及 0.35; 而前两次的 σ 平均值为 0.27 ± 0.09 , 后两次的为 0.31 ± 0.06 。

(6) 潮连岛海区: 1968 年末至 1969 年初,中国科学院海洋研究所在这里进行了三次实验;序号编为 21[#]—23[#], 实验点选在青岛外海,离崂山头海岸约 59.4 公里,离潮连岛约 30 公里;水深 39 米,这里属较深的远海。三次实验所得 $\log P_m - \log t$ 回归线见附图 6。相应的 | r | 值分别为 0.55, 0.87 及 0.77。第一次采样 13 次,所得 | r | 值已在 $\alpha = 0.05$ 水平的显著值之下,故这次实验的参数值不再进行计算。22[#], 23[#] 采样数分别为 14 及 11 个, | r | 值都在 $\alpha = 0.01$ 水平的显著值之上,这表明后两次实验所得 $\log P_m - \log t$ 有好的线性关系。计算所得两次 m 值分别为 1.71 及 2.21。由附表 1 可知该两次水文气象条件差别只在于 22[#] 的风力为 2 级且无浪,而 23[#] 则风 3 级浪 2 级。这似乎再次表明在海水较深的外海,风浪增大时有使 m 值增大的倾向。作为初级近似,如取 $m = 2$, $h = 10$ 米,则两次的 σ 值分别为 1.31 及 0.34 厘米/秒。

(7) 舟山海区: 这里与外海有一定的联系,水道复杂水体不稳。国家海洋局第三研究所在这里做过几次实验。实验方法与上述的中国科学院海洋研究所的方法相同。我们对 1975 年 10 月在这里所作的几次海上实验数据进行了分析研究,结果如下。

01 站实验: 序号编为 24[#]; 实验点水深 26 米;离大陆崎头山约 300 米,为一近岸区。实验投放的放射性同位素 Co⁶⁰ 用量为 20 毫居里;当时水文气象条件见附表 2。我们重新计算所得的 $\log P_m - \log t$ 回归线见附图 7。相关系数 $r = -0.91$, 表明有好的线性关系。所得 m 值为 2.01。如取 $m = 2$, $h = 5$ 米,计算所得 σ 为 0.56 厘米/秒。

04 站实验: 序号编为 25[#]; 实验地点水深 15 米,离大嵩地区约 3000 米;基本上为一湾口区。水文气象要素见附表 2。计算所得 $\log P_m - \log t$ 回归线见附图 7。| r | = 1.0, 线性关系很好。所得 m 值为 1.95。在误差范围内与 2 相等。如取 $m = 2$, $h = 5$ 米,得 $\sigma = 0.49$ 厘米/秒。

03 站实验: 序号编为 26[#]; 实验地点离西白莲山岛约 700 米,但离大陆海岸已超过 2 海里。海水深达 80 米,流况复杂。实验条件见附表 2。结果所得 $\log P_m - \log t$ 线见附图 7。相关系数 $r = -0.82$, 表明线性关系较好。所得 m 值为 1.83。如取 $m = 2$, $h = 10$ 米,计算所得 σ 为 1.04 厘米/秒;如取 $m = 1.8$, 则在厘米·克·秒制下 σ 值为 1.03。

02 站实验: 序号为 27[#]; 这里离大陆较远,离最近的大蚂蚁岛也有 6 公里,水深 43 米。流况也较复杂。实验条件及结果见附表 2。 $\log P_m - \log t$ 回归线仍见附图 7。计算所

得 $|r| = 0.96$, 表明线性关系很好。所得 m 值为 1.93, 与 2 很是接近。如取 $m = 2, h = 10$ 米, 得 $\sigma = 0.80$ 厘米/秒。

以上四次实验, 虽同在一个海区, 但水文条件等有较大差别, 然而所得 m 值都较接近, σ 则有一定分布范围。

(8) 辽东湾海区: 辽东湾为一比较封闭的内湾, 平均深度约 16—17 米。海水跃层不很明显, 从海面到海底的垂直搅混比较强烈, 尤以冬季为甚。在辽东湾中存在一个环流, 除 6—8 月外, 基本上都是顺时针向的。国家海洋局第一研究所在这里靠近西、北、东岸分别作了几次实验, 所用方法与上述科学院海洋所的基本相同。我们对其中三次实验所作的计算, 结果如下。

II 站实验: 序号编为 28[#]; 实验地点水深 17 米; 离辽东湾西岸约 35 公里; 实验时水文气象诸条件见附表 2。所得 $\log P_m - \log t$ 回归线见附图 8。所得 $|r| = 0.94$, 表明有很好的线性关系。计算所得 m 值为 2.02。如取 $m = 2, h = 10$ 米, 则得 $\sigma = 1.28$ 厘米/秒。

III 站实验: 序号为 29[#]; 这里水深 26 米; 离辽东半岛大孤山约 25 公里。实验时水文气象要素见附表 2; 所得 $\log P_m - \log t$ 回归线见附图 8。所得 $|r| = 0.90, m = 1.84$ 。如仍取 $m = 2$ 及 $h = 10$ 米, 计算所得 σ 值为 1.56 厘米/秒。如取 $m = 1.84$, 则 σ 值在厘米·克·秒制下有值 1.64。

IV 站实验: 序号为 30[#]; 这里水深 25 米; 离辽东湾西岸团山约 23 公里; 实验条件及 $\log P_m - \log t$ 回归线分别见附表 2 及附图 8。 $|r| = 0.90$, 表明线性关系较好。计算所得 m 为 1.67。如取 $m = 2$ 及 $h = 10$ 米, 计算所得 σ 为 2.91 厘米/秒。如若 $m = 1.67$, 则 σ 值在厘米·克·秒制下有值 3.6。

三、主要结果

首先需要指出, 这里实验研究的只是在小尺度涡动作用下的近岸海区湍流扩散问题。由于各次实验持续时间不超过 1 小时, 投放液云团的水平扩展范围不大。例如肉眼所见红色水体的水平扩展线度至多 100 米, 因而这里所研究的纯粹是小尺度的湍流扩散现象。

根据上述实验结果的整理分析, 我们可以得到如下几点主要结论:

1. 式 (1)—(5) 给出的模型, 基本上可适用于我国沿海的海水水平湍流扩散。根据上面分析, 在 8 个不同海区的 30 次实验中, 除仅有 2 次相关系数太小 ($\log P_m - \log t$ 间线性关系不显著) 和有 2 次相关系数较小 ($\log P_m - \log t$ 间线性关系较不显著) 以外, 其他 26 次的相关系数绝对值都较与 1 接近。这说明 Co^{60} 硝酸液在海水中的湍流扩散, 其云团峰值浓度 P_m 随时间 t 的变化, 基本上是满足 $\log P_m - \log t$ 直线性规律的。由此可见, 模型在不同季节, 不同水文气象条件下都能较好地与海上实验符合一致。

2. 关于 m 值: 不同实验所得扩散参数 m 值虽有一定的波动范围, 但从统计平均看, 数值都比较接近, 可取值为 2.0。

对于离岸距离小于 2 海里的长江口、海西湾、湛江湾以及舟山海区实验, 前三个的 m 平均值和舟山 01, 04 站的 m 值非常接近, 在误差范围内都可取作 2.0。

对于离岸距离大于 2 海里的其他 8 个实验, 各次实验中除了榆林海区的 m 值偏大外,

其他各次的也都较接近。除榆林 17[#]—20[#] 以外的 11 次实验的 m 平均值为 1.98 ± 0.17 ; 而包括榆林在内的 15 次实验的 m 平均值则为 2.14 ± 0.29 。因此, 从平均效果看, 与离岸距离小于 2 海里的情况相比, 也并无特别差异, m 值在误差范围内仍与 2.0 接近。

由此可以认为, 作为一种统计平均, 对于我国沿海不同海区的小尺度水平湍流扩散, m 值可取作 2.0。这一结果与 N. Ito^[4] 一致。

3. 关于 σ 值: 如取 $m = 2$, 则 σ_U 及 σ_V 分别还原为扩散速度 σ_u 及 σ_v 。

由于流体发生湍流并得以维持的必要条件是雷诺数 R 要大于某一临界值。这就意味着在其他条件不变时流体平均速度与湍流脉动的发展有一定的关系。可以预料, 海水湍流扩散系数与海水定向平动速度 U 之间是有一定关系的。取 $m = 2$ 以后, 即要求 σ 与 U 有关。

我们根据 $m = 2$ 的 19 次不同实验(其中不包括 m 值与 2 偏离较大的榆林 17[#]—20[#], 相关系数较小的 1[#], 5[#], 7[#], 21[#] 以及 U 值不太合适的 10[#], 3[#] 及 4[#]), 对 σ 值与 U 的关系作了回归分析。结果表明 σ 与 U 间基本上存在线性关系(其相关系数为 0.709):

$$\sigma = AU, \quad (14)$$

其中无量纲比例系数 $A = 0.05$ 。这样, 当 U 取海流平均速度值例如为 10 厘米/秒时, 则 σ 有值 0.5 厘米/秒。这个数值, 可供有关工程应用参考。

4. 关于扩散规律: 根据以上分析, 如取 $m = 2$, 则由 (9)、(10) 两式, 并注意各向同性条件 (13) 及 $l_x = l_y = l$ 和 $K_{xx} = K_{yy} = K$, 我们可得出如下结论。

(1) 实验结果表明 $m \approx 1$, 因此扩散系数 K 随 t 及 l 而变, 不是常数。即近岸海区的水平湍流扩散不能用简单的分子扩散 Fick 定律来描述。

(2) 对我国沿海海区, 在所讨论的水文气象条件范围内, 小尺度水平湍流扩散场基本上可以用第二节中所述的模式来描述, 并进一步有如下的规律:

近岸海区各向同性小尺度水平湍流扩散系数 K 与时间 t 之间有简单的线性关系即

$$K = \sigma^2 t. \quad (15)$$

近岸海区各向同性小尺度水平湍流扩散系数 K 与投放液云团的平均线度 l 之间, 也满足直线性关系, 即

$$K = \sigma l. \quad (16)$$

这个结果, 与熟知的 Richardson 等人的“4/3 次方定律”不同^[5]。

把式 (14) 代入后, 有:

$$K = 0.0025U^2 t, \quad (17)$$

及

$$K = 0.05Ul. \quad (18)$$

注意到 $m = 2$ 下有 $l = \sigma t$ 并利用式 (17), 即可对 l 及 K 值作出估算。例如在 $U = 10$ 厘米/秒的情况下, t 为 30 分及 1 小时下的 l 值分别为 9×10^2 和 1.8×10^3 厘米, 对应的 K 分别为 4.5×10^2 及 9.0×10^2 厘米²/秒。其数量级与一般所采用的 K 值相符^[2]。

以上就是我们的主要结果。

四、讨 论

1. 离岸距离 (L) 和 水深 (H) 对于扩散参数的影响。一般说, 水深 H 及 离岸距离 L 会

对海水的湍流尺度产生影响,从而对湍流扩散产生影响。例如 Озмидов 认为扩散特性量与相对深度 H/L 有关^[6]。但我们所得 26 个扩散参量 m 与 H , L 或 H/L 的关系并不明显。对于 H/L 值小于 0.005 的潮连岛、渤海辽东湾海区和舟山 04 站,以及 H/L 值大于 0.08 的舟山 01, 03 站来说,它们的 m 值并没有显著变化。这很可能是因为我们所研究的,只是小尺度的湍流扩散,不能反映出 H , L 对于涡动尺度影响的缘故。

2. 榆林海区的 m 值相对偏大,从而使那里的扩散系数 K 与投放液体云团平均线度 l 间的关系与线性律 (16) 或 (18) 多少有些偏离。特别是当风浪、涌浪和流速较大时,这种偏离有增大的趋势。这一点可能与平动流的剪切效应有关。但尽管如此,实验结果给出的 m 值也小于 3, 因此与 4/3 次方定律仍有一定距离。

参 考 文 献

- [1] 凌备备, 1977. 海水水平涡动扩散的半经验理论模型, 船工科技, 2: 21—32.
- [2] 景振华, 1966. 海流原理, 科学出版社, 63—67 页.
- [3] IAEA, 1961. Radioactive Waste Disposal into The Sea, Appendix V.
- [4] Ito, N., Fukuda, M. and Y. Tanigawa, 1966. Small-Scales Horizontal Diffusion Near The Coast, "Disposal of Radioactive Wastes into Seas Oceans and Surface Waters", Proceedings on the Disposal of Radioactive Wastes into Seas Oceans and Surface Waters, Held by the IAEA 16—20, May. 1966, Vienna 1966: 471—482.
- [5] Richardson, L. F., 1926. Proc. Roy. Soc., (A) 110 (1926) 709—727; Stommel, H., 1949, J. Marine Res., 8 (1949) 199—225.
- [6] Озмидов, Р. В., 1957. Изв. АН СССР Сер. Геофиз. 6

A STUDY OF THE LAWS OF SMALL-SCALE HORIZONTAL TURBULENT DIFFUSION NEAR THE CHINESE COASTAL AREAS

Ling Beibei

(The Harbin Shipbuilding Institute)

ABSTRACT

Using a two-dimensional statistical model, the mechanism of the horizontal turbulent diffusion field in the sea is discussed in this paper. And by correlation analysis, the experimental data of thirty tests in eight areas along China coastal waters are investigated, from which the fundamental parameters of horizontal turbulent diffusion due to isotropic and small-scale eddies are obtained. Further more, the basic laws of turbulent diffusion in sea water off the chinese coast are obtained as $K = 0.0025 U^2 t$ and $K = 0.05 Ul$. It shows that the relationship between the coefficient of diffusion and the dimension of the cloud released is a linear one as contrary to the usually accepted law of 4/3 power.