

渤海近岸海水扩散规律的研究*

李培泉 张法高 任广法 康兴伦
王品爱 于银亭 卢光山 袁毅
(中国科学院海洋研究所)

随着工业和科学的迅速发展,研究和解决近岸海水扩散及污染问题日益受到广泛的注意^[1-3],许多国家相继进行了大量的工作。六十年代初,考虑到美苏核试验的影响,我国就开展了海洋放射性污染的调查。七十年代又开展了石油和重金属污染的研究。目前,这项工作已成为国家的重点研究项目之一。研究污染物质的通量、变化、形态和海水对污染物质的容量,及其稀释扩散规律都是这项研究的重要内容。

防止海洋污染,一方面采取减少污染物质输入的方法;另一方面也可以充分利用海洋的自净能力。稀释扩散作用就是海洋的重要而迅速的自净过程之一。海洋的稀释能力与其湍流扩散问题有关。由于流场中的湍流扩散过程以及影响湍流扩散因素的复杂性,故许多研究结果都有一定的局限性。

1980年,我们选用罗丹明-B作示踪体研究了渤海近岸区(天津塘沽灯塔附近)的稀释扩散过程。现场实验共进行了四次,搞清了渤海近岸区的稀释因子、 $\log P - \log t$ 关系、云团的水平和垂直分布。同时,对扩散作用的有关因子、湍流扩散系数与 t 和尺度的关系进行了讨论。最后以放射性为例,估算了海水的每月容许排放次数。

实验方法

1. 实验仪器和药品

“金星号”和三条20马力的机动小船;法制分光光度计一台;国产721型分光光度计一台;工业用酒精200kg;罗丹明-B(工业用)100kg;塑料桶(50公升)2只;250ml玻璃样品瓶400只。

2. 现场示踪实验

海上现场示踪实验以“金星轮”和三条20马力的渔船进行。在“金星轮”上进行了雷达定位、药品配制、抛样和进行水文物理因子、气象等资料的现场观测;三条小船跟踪采样。

具体步骤:称取5, 10, 20, 29 kg罗丹明-B有机染料,分别倒入容积为50公升大型塑料桶中(1—2个),然后加入不同量的工业酒精和海水,配制成20—40%的罗丹明-B-乙醇溶液。用力搅匀使其呈溶解状态。用吊杆将塑料桶徐徐吊出船舷,放入海水中。当塑料桶的开口一端与海水处在同一水平面上时,将拴在塑料桶底部的绳子迅速拉起,罗丹

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第961号。

参加海上观测和采样的有王一飞、刘明星、庞学忠、刘增文、周陈年、李丽云、冷彦贵、尹学明等同志,谨此致谢。

收稿日期:1982年4月19日。

明-B-乙醇溶液立即以瞬时点源的方式排入海水里。三条小船以一定的时间间隔跟踪扩散着的染料云团取样,开始取样间隔小一些,例如10—20分钟。随着时间的延长,取样间隔也相应延长,例如从30分钟至1小时等。采样可在船舷用塑料桶进行。样品装入250 ml聚乙烯塑料瓶或玻璃瓶中,带回实验室测定。

3. 室内分析

室内分析采用比色法和荧光分析法。对罗丹明-B溶液浓度大的样品采用比色法;浓度很低者则采用荧光法。后者的灵敏度较前者可高2—3个数量级。通过两种方法的对比实验,其结果完全一致。这样,可以不经处理而直接测定样品,省去高浓度溶液的稀释手续而又保证其结果的准确性。比色法的最佳吸收峰选在554 nm处;荧光法分析的最佳发射光谱为550 nm。有关罗丹明-B测定方法的研究将另有专文报道。

结果与讨论

1980年9月6日、11日在渤海湾(118°59'E, 38°55'N)用罗丹明-B作示踪体进行了四次稀释扩散实验。实验用的罗丹明-B分别为29, 20, 10, 5 kg, 其浓度分别为 3.2×10^8 , 4.3×10^8 , 1×10^9 和 $1.11 \times 10^8 \mu\text{g/l}$ 。

1. 稀释因子

1980年9月6日进行了第一次实验,其水文、气象条件和实验数据如表1, 2所示。

表1 9月6日水文要素变化一览表

观测时间	表面流		风		透明度	表层水温	水色	海况
	流速(m/min)	流向	风速(级)	风向				
10:00	24	252°	3	120°			10	2
10:30	24	288°	3	60°		24.8	10	2
11:00	25.8	291°	2	0°		24.6	10	2—3
11:30	30	282°	2	330°		25.0	10	2—3
12:00	30	296°	2	270°		25.0	14	2—3
12:30	22.2	275°	2	300°		25.0	17	2—3
13:00	16.2	306°	4	0°	1.0	25.0	17	2—3
13:30	4.8	270°	4	310°	1.0	24.6	17	
14:00	0	260°	4	330°	0.7	24.6	16	平潮转流
14:30			4	310°	0.7	24.3	16	

1980年9月6日海况为2—3级;风为2—4级,由于罗丹明-B的投放选择在低潮或低潮前三个小时,因此,染料云团可在潮流的影响下平动,当然,在此平动过程中也逐步扩散。从表2看出染料云团峰值的稀释因子可以在10分钟后稀释到 10^4 ,在三个小时后稀释到 10^7 倍。在染料云团边缘区域,其浓度在几小时内也相应地稀释到 10^5 — 10^7 倍。但一般说来,边缘部分的浓度变化幅度低于峰值浓度(因为此区的浓度一般低于峰值浓度)。关于整个云团稀释因子的变化如图1所示。

1980年9月11日进行了第二次海上稀释扩散实验。根据第一次实验的情况,我们同时用5, 10, 20 kg罗丹明-B分三个小船分别进行实验。采样尽量选在最深颜色处,一般为中前方,我们将其视为峰值浓度。同时记录染料云团的形状变化和大小。实验时的水

表 2 第一次实验中罗丹明-B 的浓度变化及稀释因子

(样品抛放时间为 1980 年 9 月 6 日 0910; 罗丹明-B 的用量为 29kg; 液体总体积为 90 升, 原始样品浓度为 $3.1 \times 10^8 \mu\text{g/l}$)

采样时间	峰值左侧		染料云团峰值		峰值右侧	
	浓度 ($\mu\text{g/ml}$)	稀释因子	浓度 ($\mu\text{g/ml}$)	稀释因子	浓度 ($\mu\text{g/ml}$)	稀释因子
09:20			11.0	2.9×10^4		
09:30			7.1	4.6×10^4		
09:32					3.29	8.33×10^5
09:40	0.196	1.63×10^6	1.23	2.6×10^5		
09:45					0.127	2.5×10^6
09:50			0.56	5.8×10^5		
09:55	0.052	6.15×10^6			0.126	3.54×10^6
10:00	0.142	2.25×10^6	0.72	4.47×10^5	0.143	2.24×10^6
10:10			0.79	4.08×10^5	0.063	5.08×10^6
10:30	0.107	2.99×10^6	0.40	8.05×10^5	0.043	7.44×10^6
11:00	0.069	4.64×10^6	0.16	2.0×10^6	0.044	7.27×10^6
11:30	0.082	3.90×10^6	0.055	5.8×10^6	0.040	8.0×10^6
12:00	0.090	3.55×10^6			0.069	4.64×10^6
12:30	0.103	3.10×10^6	0.046	7.0×10^6		
13:00	0.055	5.81×10^6	0.023	1.4×10^7	0.014	2.28×10^7
13:30	0.033	9.69×10^6	0.014	2.3×10^7	0.014	2.28×10^7
14:00	0.028	1.14×10^7	0.025	1.29×10^7	0.012	2.67×10^7
14:30	0.021	1.52×10^7	0.022	1.46×10^7		
15:00			0.022	1.46×10^7		

表 3 9 月 11 日水文要素变化一览表

观测时间	表面流		水色	透明度	表层水温	海况
	流速 (m/min)	流向				
08:45	26	94°	16	0.8	24.2	2
09:00	27	103°	16	0.8	24.2	2
09:15	25	102°	16	0.8	24.2	2
09:30	26	100°	15	0.8	24.0	2
10:00	19	96°	16	0.8	24.0	2
10:30	20	96°	16	0.8	24.0	2
11:00	15	89°	16	0.8	24.0	2
13:30	25	292°	16	0.8	24.8	1—2
14:00	30	295	16	0.8	24.8	1

文、气象条件、浓度变化和稀释因子如表 3 和表 4 所示。第二次实验海况为 1—2, 这对云团的扩散是不利的, 在 3—6 小时的时间间隔内, 稀释因子有 2—3 个数量级的变化。从三次不同批量的实验来看, 染料的数量虽不同, 但是其变化趋势一致, 量少者持续的时间短, 量大者持续的时间长。稀释因子随时间的变化如图 2 所示。

2. $\log p$ - $\log t$ 关系

根据几次实验的大量资料可以进行回归分析, 求出 $\log p$ - $\log t$ 的关系曲线, 如图 3 所示。

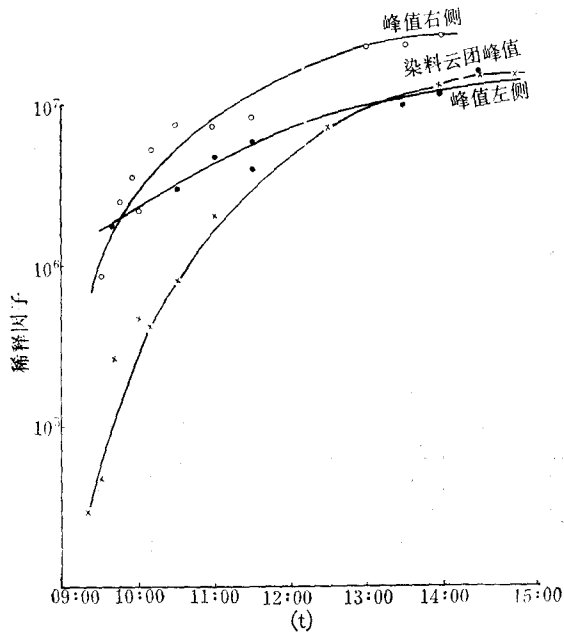


图 1 染料云团稀释因子与时间的关系

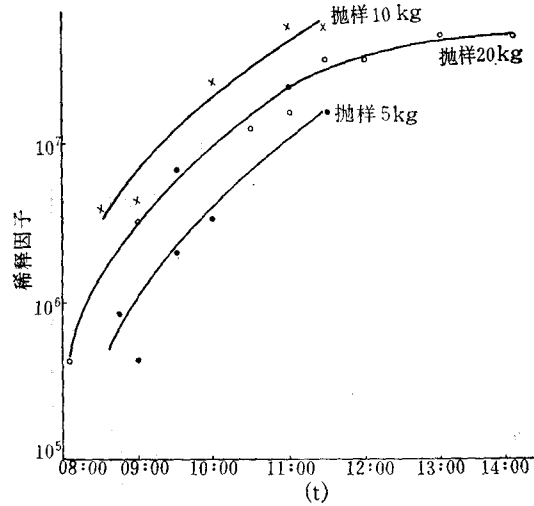


图 2 染料云团稀释因子与时间的关系

表 4 第二次实验时罗丹明-B 的浓度变化及稀释因子

(样品抛放时间为 1980 年 9 月 11 日)

采样时间	罗丹明-B浓度变化及稀释因子					
	5 公斤 ($1.11 \times 10^8 \mu\text{g/l}$) (0835 抛样)		10 公斤 ($1.0 \times 10^9 \mu\text{g/l}$) (0820 抛样)		20 公斤 ($4.3 \times 10^8 \mu\text{g/l}$) (0805 抛样)	
	浓度 ($\mu\text{g/ml}$)	稀释因子	浓度 ($\mu\text{g/ml}$)	稀释因子	浓度 ($\mu\text{g/ml}$)	稀释因子
08:05					1.03	4.26×10^5
08:30			0.30	3.33×10^6	0.051	8.43×10^6
08:45	1.2	9.25×10^5				
08:55						
09:00	0.26	4.26×10^5	0.207	4.83×10^6	0.134	3.2×10^6
09:30	0.055	2.02×10^6	0.147	6.80×10^6	0.062	6.9×10^6
10:00	0.030	3.7×10^6	0.042	2.38×10^7	0.025	1.72×10^7
10:30	0.033	3.36×10^6			0.035	1.23×10^7
11:00	0.007	1.58×10^7	0.019	5.26×10^7	0.019	2.26×10^7
11:30	0.007	1.58×10^7	0.019	5.26×10^7	0.012	3.58×10^7
12:00					0.013	3.30×10^7
13:00					0.009	4.78×10^7
14:00					0.009	4.78×10^7

从图 3 看出: 罗丹明-B 的浓度是 t 的函数, 有较好的线性关系, 相关系数接近 0.7—1.0 之间。同时, 从四条回归曲线可看出, 其变化规律和趋势是相似的, 不同之处只是罗丹明-B 用量大者曲线偏右方, 用量少者偏左方。计算得知: 四次实验的 $\log p - \log t$ 关系分别由下式表示:

(1) $\log p = -1.79 \log t + 7.85$ (5kg 者)

(2) $\log p = -1.78 \log t + 8.38$ (10kg 者)

(3) $\log p = -1.85 \log t + 8.50$ (20kg 者)

(4) $\log p = -1.87 \log t + 9.26$ (29kg 者)

颜料在 5—30kg 范围内,总的可以用 $\log p = -1.82 \log t + 8.50$ 来表示。

3. 罗丹明-B 的平面分布

罗丹明-B 作为瞬时点源排放之后,其染料云团的形状和浓度分布都随时间而变化。根据观察得知,在罗丹明-B 刚刚排放之后大约 1 分钟左右的短暂的时间内呈圆形,但在风力和海流的影响下,很快就变成椭圆形。在 1—1.5 小时后,云团逐步被拉长,并且于 4—5 小时后拉成月牙形,估计与 Ekman 海流的影响有关。

罗丹明-B 浓度的水平分布是随时间延长而逐步降低的。如前所述,罗丹明-B 溶液排放 10 几分钟以后,染料云团从表面看来颜色是比较一致的,其分布可能比较均匀。随后,颜色的分布出现了明显的差异,最深的部分在前端偏后的位置,其余部分随着与深色部分的距离增加而变浅。由于染料云团的继续扩大,这种现象在四个小时以后即逐渐消失。我们重点对 9 月 11 日抛

样实验之后 5 小时和 6 小时的染料云团进行了比较全面的分析测定,这时云团似带形,其颜色的深浅已难以辨认。我们用小船沿着云团的中心从头至尾采样,其浓度变化如图 4 和 5 所示。

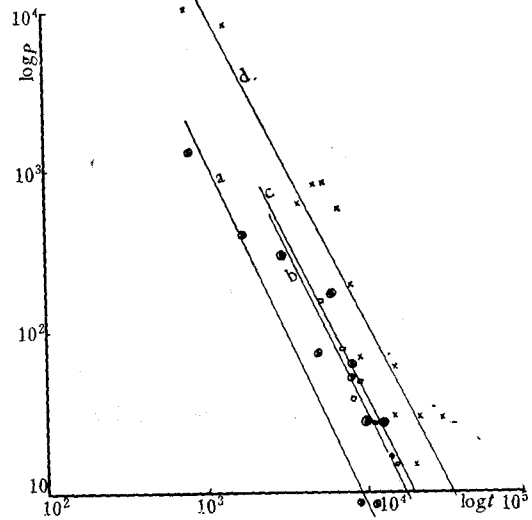


图 3 $\log p - \log t$ 曲线

- a. 投放罗丹明-B 5kg; b. 投放罗丹明-B 10kg;
- c. 投放罗丹明-B 20kg; d. 投放罗丹明-B 29kg.

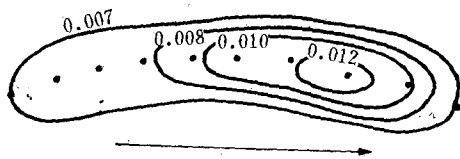


图 4 5 小时后染料云团的分布梯度略图

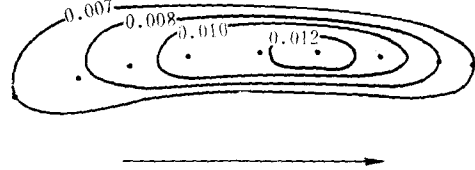


图 5 6 小时后染料云团的分布梯度略图

从图 4 与图 5 的对比可以看出: (1) 在扩散 5—6 小时后,罗丹明-B 浓度基本均匀,变化亦很慢; (2) 峰值浓度虽不明显但却仍然存在,大约仍位于前半部。如果把这个平面分布视为近似长方形来处理,罗丹明-B 总量为 $2.79 \times 10^{10} \mu\text{g}$, 取其平均浓度为 $9.2 \times 10^{-3} \mu\text{g/ml}$, 则扩散 5 小时的分布状况理论计算值是: 长度应为 1000 m, 宽度应为 202 m, 深为 15 m, 其面积约为 $2.0 \times 10^5 \text{m}^2$, 体积为 $3.0 \times 10^6 \text{m}^3$ 。实验时,我们实地观测值是长度为 996m, 宽为 200m, 水深 15m, 两者是相似的。抛样 6 小时后的平均浓度为 $9.75 \times 10^{-3} \mu\text{g/ml}$, 其分布面积为 $1.9 \times 10^5 \text{m}^2$, 分布体积为 $2.85 \times 10^6 \text{m}^3$, 理论计算染料云团的长度为 800 m, 宽度为 238 m, 深度 15 m。我们实地观测值为长 736 m, 宽 230 m, 水深 15m, 其

面积和体积与计算结果近似。很明显,6小时的扩散面积比5小时的略有减小,这可能与潮汐流的转向有关。

4. 罗丹明-B 在海水中的垂直分布

为了更好地了解污染云团的立体分布,我们在两次实验中都选择性地作了垂直取样,其变化情况如图6和7所示。

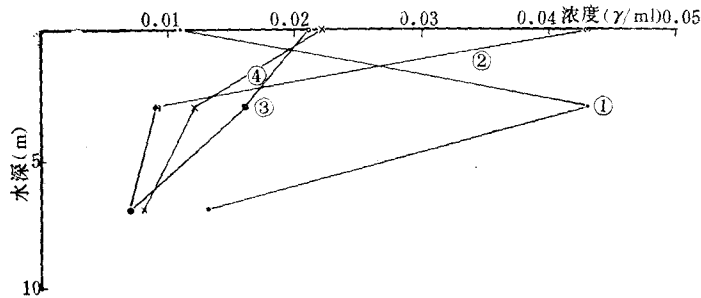


图6 1980年9月6日实验中罗丹明-B的垂直分布(0910抛样)
(1) 11:00 取样; (2) 13:00 取样; (3) 13:30 取样; (4) 15:00 取样。

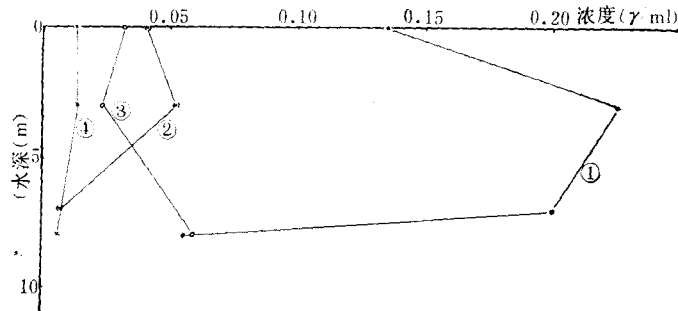


图7 1980年9月11日实验中罗丹明-B的垂直分布(0805抛样)
(1) 09:00 取样; (2) 10:00 取样; (3) 11:00 取样; (4) 12:00 取样。

从以上两个图形中可看出:罗丹明-B垂直分布的状况也是很复杂的。例如,在一个云团的不同部分可能同时存在着许多不同的分布状态,但是仍然有一些共同的规律,例如,罗丹明-B乙醇溶液在作水平运动的过程中也在逐步下沉,图6,7中的(1)线就明显地表现了这种规律,似乎在抛样后1个小时左右,高浓度的罗丹明-B能下沉至3m深的地方。另外,从图6和7还可看出:表层罗丹明-B浓度和底层浓度的差距随着时间的延长而逐渐缩小,当五、六小时后,上下趋于一致,这表明染料云团在经过较长时间的湍流扩散过程之后趋于均匀分布状态。

5. 扩散参数及其主要结论

罗丹明-B在海水中的湍流扩散是个随机过程,服从高斯误差分布律,其特性与染料云团的几何性质的尺度有关。因此,可以认为其扩散系数,速度标准误差等扩散特征量都是时间的函数,只有与云团尺度相当或更小尺度的海水涡动,才能对湍流扩散有所贡献。像海流那样大尺度的涡动只能使云团产生平移运动。

假若我们将这次罗丹明-B 示踪实验视为一小尺度的扩散, 并近似的认为它是各向同性的^[2], 因此

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

$$\begin{cases} \sigma_u^2 = \frac{m^2}{4} \sigma_u^m t^{m-2} \\ \sigma_v^2 = \frac{m^2}{4} \sigma_v^m t^{m-2} \\ L_x^2 = \sigma_u^m t^m \\ L_y^2 = \sigma_v^m t^m \\ P_m = Q / 2\pi (\sigma_u \sigma_v)^{\frac{m}{2}} t^m \end{cases}$$

P 为在任何一点的浓度; P_m 是座标为 x_0, y_0 时的浓度; σ_u, σ_v 分别为 x, y 方向上的扩散速度; σ_u^m, σ_v^m 分别为与扩散速度有关的参数; L_x, L_y 分别为沿 x 及 y 轴方向上扩散距离的平均标准误差。

通过分析得知 $m = 2$

因此

$$\sigma_u^2 = \frac{2^2}{4} \sigma_u^2 t^{2-2} = \sigma_u^2$$

$$\sigma_v^2 = \frac{2^2}{4} \sigma_v^2 t^{2-2} = \sigma_v^2$$

此时 σ_u 和 σ_v 即为扩散速度 σ_u 和 σ_v , 此量与 t 无关。根据流体平均速度与湍流脉动有一定关系的观点可以预料海水湍流扩散系数与海水定向平动速度 U 之间有一定关系:

$$\sigma = AU$$

A 为无量纲比例系数。根据 1969 年我们用同位素在若干海区所作的实验得知: $A=0.05$, 若 U 为 34cm/s, 则

$$\text{扩散速度 } \sigma = 0.05 \times 34 = 1.7 \text{ cm/s}$$

若 $m \neq 1$, 扩散系数 K 将随 t 及 L 而变, 不是常数, 即此时湍流扩散不能用分子扩散的 Fick 定律描述。在我们研究的情况下

$$K = \sigma^2 t,$$

$$K = \sigma L_0$$

若把前面 $\sigma = AU$ 带入, 则得

$$K = \sigma^2 t = (AU)^2 t = (0.05 \times 34)^2 t = 2.89t,$$

$$K = \sigma L = AUL = 0.05 \times 34L = 1.7L_0$$

已知 $m = 2$ 时, $L = \sigma t = 1.7t$;

取 $t = 10$ 分, 30 分和 3 小时,

则 L 分别为 1020 cm, 3060 cm 和 18360 cm

故 K 分别为 1.7×10^3 , 5.2×10^3 和 $3.1 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ 。

6. 利用海洋进行废物处理的可能性

实验证明,海水在海流、风力和湍流扩散力的影响下不断运动,它可以使污染物扩散,也可以将其搬运到较远的海区,也有的污染物下沉到海底。

海水的稀释扩散是海洋的重要自净过程,我们可以利用这一特性,将毒物抛入海洋。随着目前工业的迅速发展,各种有毒废物大量产生,因此,认真研究海洋对其废物的容量是非常重要的,其计算与扩散问题紧密相关。利用海洋处理废物的原则是使海洋中的废物在短时间内达到国家规定的最大允许浓度之下。比较方便的方法是将毒物的排放量限制在最高允许浓度和稀释因子的乘积这一范围内。为安全起见,应当选用在不利扩散条件下所测得的稀释因子,并对最高允许浓度乘以适当的安全系数。

利用稀释扩散实验中求得的扩散速度和根据 Joseph 和 Sendner 水平扩散理论推出的公式^[6],可以计算某一海区每月安全排放毒品的次数。下面以塘沽实验海区为基础,以放射性物质为例进行计算:

$$N = \frac{9DAT^2 S_{PPC}}{800T_{1/2} \cdot M t_{PPC}}$$

M 为每天排放的污染物质总量; D 为海水中废物扩散层的厚度(m); T 为平均周期,取30天,比点源废物扩散到小于该海区的局部允许浓度所需时间要长得多,但比人的寿命要短得多; A 为在 T 时间内进行 N 次排放的部分海区面积(m^2); $T_{1/2}$ 为海水的半交换期。定义为在面积 A 中用非污染区域的海水更换污染海水一半所需的时间(day); S_{PPC} 为污染物质的局部允许浓度; t_{PPC} 为污染物质质量为 M 的 N 次排放浓度小到 S_{PPC} 值以下所需要的时间

$$t_{PPC} = \sqrt{\frac{nM}{2\pi D\sigma^2 S_{PPC}}}$$

σ 为同位素在海水中的平均扩散速度(cm/s); $n = 360^\circ/Q$; Q 为可能扩散的弧度。

假定实验海区取平均深度 $D = 8m$; $A = (20 \times 1000 \times 20 \times 1000) = 4 \times 10^8 m^2$; $T = 30day$; $t_{1/2} = 30day$, σ 保守性的为 $0.5cm/s$ (不是 $1.7 cm/s$); $Q = 60^\circ$, 则

$$\begin{aligned} t_{PPC} &= \sqrt{\frac{360/60}{2\pi \delta^2 D}} \sqrt{\frac{M}{S_{PPC}}} = 69 \sqrt{\frac{M}{S_{PPC}}} \\ N &= \frac{9DAT^2 \cdot S_{PPC}}{800T_{1/2} M t_{PPC}} = \frac{9 \times 8 \times 4 \times 10^8 \times (30 \times 24 \times 3600)^2}{800 \times (30 \times 24 \times 3600) M t_{PPC}} \\ &= \frac{9.33 \times 10^{13}}{\frac{M}{S_{PPC}} t_{PPC}} = \frac{9.33 \times 10^{13}}{\frac{M}{S_{PPC}} \times 0.69 \times 10^2 \sqrt{\frac{M}{S_{PPC}}}} \\ &= \frac{1.35 \times 10^{12}}{\sqrt{\frac{M^3}{S_{PPC}}}} = \frac{1.35 \times 10^{12}}{\left(\frac{M}{S_{PPC}}\right)^{3/2}} \end{aligned}$$

下表列出了排放浓度(MCi)、部分允许浓度(S_{PPC})和排放次数(N)之间的关系。

表 5 排放浓度 (MCi)、 S_{PPC} 和排放次数 (N) 之间的关系

M/S_{PPC}	t_{PPC} (S)	t_{PPC} (day)	N (每月次数)	S_{PPC}			
				$10^{-9}(M)$	$10^{-8}(M)$	$10^{-7}(M)$	$10^{-6}(M)$
10^4	6.9×10^3	0.08	1.35×10^6	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}
10^5	2.2×10^4	0.25	4.3×10^4	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
10^6	6.9×10^4	0.8	1.35×10^3	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1
10^7	2.2×10^5	2.5	4.3×10	10^{-2}	10^{-1}	1	10
10^8	6.9×10^5	8.0	1.35	10^{-1}	1	10	10^2
10^9	2.2×10^6	25	4.3×10^{-2}	1	10	10^2	10^3
10^{10}	6.9×10^6	79.8	1.35×10^{-3}	10	10^2	10^3	10^4

结 语

1. 用罗丹明-B 作示踪体研究海洋扩散过程是行之有效的办法。罗丹明-B 溶液在海水中性能稳定、颜色鲜明, 所得结果真实可靠。

2. 渤海近岸海区的稀释因子在 10 分钟至 6 小时的时间范围内为 10^4-10^7 。

3. 对罗丹明-B 浓度随时间的变化进行回归分析后, 发现 $\log p - \log t$ 是直线关系。

4. 罗丹明-B 在海水中的水平和垂直分布主要受涡动扩散、风、海流等因素影响, 其分布均有一定的规律, 但情况较为复杂。

5. 海水扩散不遵守 Fick 定律。 $m = 2$, 此时扩散速度与 t 无关; 扩散系数 $K = \sigma^2 t = \sigma L$, 即扩散系数与时间 t 和尺度 L 有关。

6. 利用稀释因子与最大允许浓度的乘积, 可以确定向海洋排放废物的量; 利用 Jonson 等公式和求出的扩散速度, 可以计算该海区每月排污的次数以及达到部分允许浓度(PPC)所需的时间, 从而可以在科学的基础上, 运用海水的自净能力为人类分担日益增长的环境污染所造成的负担。

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): 289—294.
- [2] 凌备备, 1980. 中国近海区小尺度水平湍流扩散规律的研究. 海洋与湖沼 11(1): 1—12.
- [3] 唐永奎, 1980. 污染物在海洋中扩散. 海洋环境保护 1: 1—27.
- [4] IAEA, 1961. Radioactive Waste Disposal into the sea. Appendix V.
- [5] Ito, N., M. Fukuda 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. pp. 471—482.
- [6] NAS-NRC, 1959. Considerations on the Disposal of Radioactive Wastes from Nuclear-powered ships into the Marine Environment. pp. 1—51.
- [7] Okubo, A., 1962. Horizontal diffusion from an instantaneous point-source due to oceanic turbulence. Chesapeake Bay Institute Tech. Rept. 32: 123.
- [8] ———, 1966. A note on horizontal diffusion from an instantaneous source in a nonuniform flow. J. Oceanogr. Soc. Japan 22: 35—40.
- [9] ———, 1968. Some remarks on the importance of the "sear effect on horizontal diffusion". *ibid.* 24(2): 60—69.
- [10] ———, 1971. Horizontal and Vertical Mixing in the Sea, Impingement of Man on the Oceans. John Wiley & Sons, Inc. pp. 89—168.

A STUDY ON DIFFUSION RULE OF SEA WATER IN BOHAI SEA*

Li Peiquan Zhang Fagao Ren Guangfa Kang Xinglun Wang Pinai

Yu Yinting Lu Guangshan and Yuan Yi

(Institute of Oceanology, Academia Sinica)

ABSTRACT

A study on diffusion rule of sea water was made with Rhodamine-B in the Bohai sea in 1980. The Rhodamine-B is a good tracer for diffusion study of sea water because it is stable and bright in colour for sampling and analysing during the experiment. The diffusion factor (D. F.) is 10^4 — 10^7 in the Bohai sea during a period of 10 minutes to 6 hours. The relationship between the $\log p$ and $\log t$ is linear, and may be expressed as follows:

$$\log p = -a \log t + b$$

here $-a=1.87$ or $a=-1.87$ $b=9.26$

The horizontal and vertical distributions of Rhodamine-B in sea water are mainly influenced by eddy diffusion caused by wind and current, with the vertical distribution being more complex. The molecular diffusion is not primary in this instance. The diffusion rate is not related to the time when $m=2$, but the diffusion coefficient $K = \sigma^2 t = \sigma L$. K is related to the scale of diffusion L and t in this formula. The waste amount which may be allowed enter into the sea is defined as the product of D. F. and maximum permissible concentration (MPC). Using Jonson's formula and the diffusion rate the discharging times per month and the time needed to reach the part permissible concentration (PPC) can be calculated to safe guard the well-beings of the populace against being over polluted.

* Contribution No. 961 from the Institute of Oceanology, Academia Sinica.