

长江九江段水中污染物稀释扩散 规律的研究*

李培泉

苗绿田

(中国科学院海洋研究所, 青岛) (青岛港务局)

夏达英

王新宇

(国家海洋局一所, 青岛) (江西省九江市环保局)

提要 用罗丹明-B 染料作示踪体研究了长江九江段溶解污染物质的扩散规律。该区为顺直河段, 水流速度约为 22—80cm/s, 6kg 罗丹明-B 的扩散长度为 3240m。在 4 级风下, 在 40min 内, D. F 值从 10^2 变化到 10^9 , 说明江水中污染物的扩散还是很快的。实验表明, 污染物质的浓度变化与时间的 2.9 次方成反比。九江段的扩散系数为 $1.23\text{m}^2/\text{s}$ 。九江市取水口上游 500—1000m 外贸货运码头所排放的污水和其它污染物质对取水口有一定的影响, 必须对污物的排放加以限制。

随着现代化工业的迅速发展和长江两岸人口的迅速增长, 进入江水的污染物质(包括石油、重金属、有机物、同位素及生活污水等)日益增加, 排污口形成的局部沿岸污染带不时出现, 长达几百米至几十公里。因此开展稀释扩散规律的研究, 充分利用江水的自然稀释能力, 防止未来长江水的污染是一个非常重要的问题。

1985 年 11 月 6—11 日, 我们在九江水段进行了罗丹明-B 示踪扩散实验。除初步搞

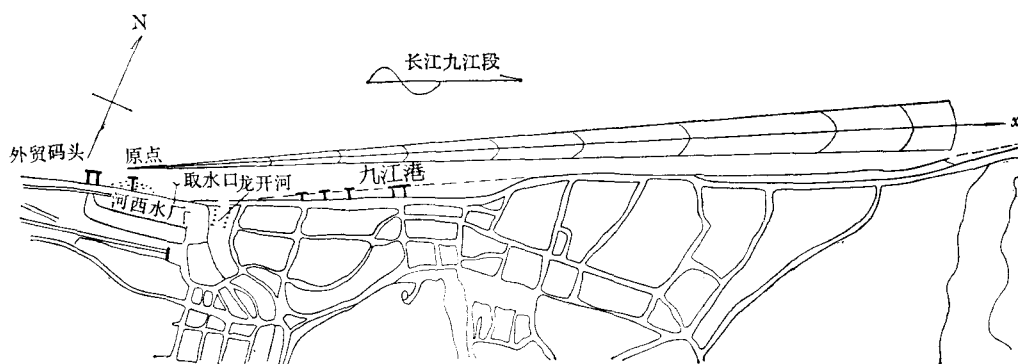


图 1 九江口外贸码头取水口及水环境模拟实验流迹图

Fig. 1 The diagram of civil water pipe entrance and experimental flow track

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 1705 号。

收稿日期: 1986 年 3 月 6 日。

清了九江水段的扩散规律之外,还对九江外贸码头建成后污染物可能对九江市取水口的影响作了探讨(取水口在外贸码头下游 500m 处,见图 1),为九江港建工程、取水工程和环保工程提出了科学依据。

一、主要实验条件和设备

1. 12 马力小船 2 条; 2. 直读式海流计, 风向风速仪; 3. LGC₁-1A 型拖曳式水中荧光计; 4. 罗丹明-B 30kg; 5. 工业酒精 200kg。

二、测定方法

对罗丹明-B 直接在现场水体中进行拉格朗日式或欧拉式的测定,可以迅速地了解色团浓度的时空分布状况。这种方法能快速、准确地对大范围现场浓度的时空分布作出直接测定,并且可以得到连续的变化曲线,对于云团的 x, y, z 轴变化均可得到直观的图式。但方法的缺点是在高浓度时浓度与荧光强度变化不成直线关系。为了避免这一缺点,可在抛样之后拖长一段时间 (3—5min) 再进行测定。

在工作开始之前,取实验水域的水样配制标准浓度的罗丹明-B 水溶液用于定标,作出罗丹明-B 的工作曲线,如图 2 所示。

1. 罗丹明-B-乙醇溶液的配制和抛放

称取一定量的罗丹明-B 染料,放入大塑料桶,加入乙醇充分搅拌,待溶解之后,加入江水直到所需体积(示踪染料母体液)。将盛染料的塑料桶放在实验船头部,直接投放到实验水域中,作瞬时点源排放。

2. 现场测定

将拖曳式水中荧光计放在船舷,定深在水下 1—2m 深处,首先进行水域本底测量,调好测试系统,小船在抛样数分钟后,跟踪示踪染料色团进行纵向拉格朗日式观测。在观测过程中,定时从色团末端穿过中心区进行间断性测定,测定工作直到 X-Y 函数记录仪所显示的值达到水体本底值为止。

由于江水流速很大,色团主要沿水流方向迅速扩散,因此,作横向测定是困难的。

3. 外贸码头处垂直抛样对取水口影响的实验

利用罗丹明-B 在水中有一定的溶解度,可以将罗丹明-B 染料用麻袋包起来,在取水口上游、外贸码头附近,距岸 50—80m 处,放到不同深度,袋中染料自然溶解后立即顺水

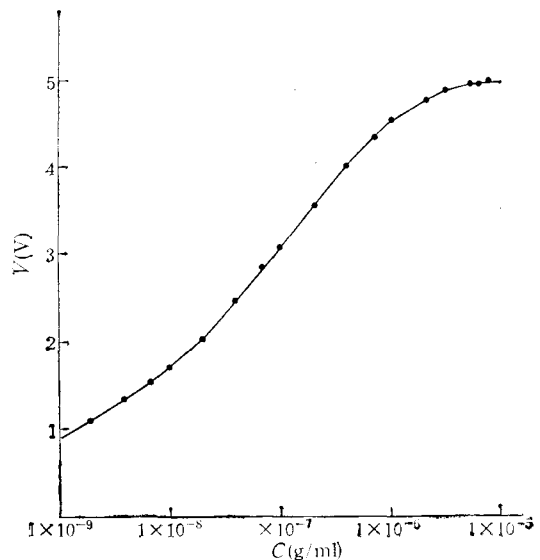


图 2 LGC₁-1A 型水中荧光计工作曲线(罗丹明-B)

Fig. 2 Working Curve of LGC₁-1A Fluorimeter under Water (Rhodamine-B)

而下,在取水口处放下荧光计,不断测定上游下来的罗丹明-B染料通过的情况。染料可以放在表层、中层(6m层)和底层,而荧光计不要改变上下位置,但可横向移动。这种实验不是以形成连续源为目的,而主要是了解码头近区被污染时,能否进入取水口。

4. 染料下沉深度的测定方法

将配制好的具有一定浓度的罗丹明-B染料从船舷上投放在实验水域中,另一小船在下游一定距离等待着,并将水中荧光计放到水下一定深度(在最初测定阶段可以放到6—7m,以后阶段放到底层),待染料进入船体位置之后,将荧光计慢慢提起,记录罗丹明-B的下沉深度和浓度垂直变化。当水中荧光计到达表层后,立即又缓慢地将水中荧光计放到底层,重复垂直分布和下沉深度的实验。第一次测量完后,小船再移动到色团的下方,等待进行第二次相同方式的测定,直到上下呈均匀分布和罗丹明-B的浓度不能显示为止。

三、结果与讨论

1. 九江港河段水体的稀释因子(D.F)

表1,2是九江港岸线区两次实验时罗丹明-B的浓度变化及稀释因子。表3是实验时的气象资料。

从两次实验看出,长江水的稀释能力是很大的,在较好的天气情况下(4级风以下),罗丹明-B的浓度经过40—50min可以有7个量级的变化(从 10^{-2} — 10^{-9} g/ml),其稀释因子达到 10^7 (参见表1,2)。这两次实验没有船只的搅动影响(港监船维持秩序),风速为2m/s左右,在这种情况下所得资料就可以代表长江水在试验期间水体的扩散情况。

2. 浓度变化与时间的关系(logc-logt曲线)

进入江水的污染物质随着时间而逐步降低,我们将浓度和D.F值分别与时间进行

表1 1985年11月7日上午扩散实验中罗丹明-B的浓度变化及稀释因子

Tab. 1 Variation of Rhodamine-B concentration and D.F Value with time in diffusion experiment on Nov.7, Am, 1985

相距时间 (s)	浓度 (g/ml)	荧光计输出测量值 (V)	D. F 值
90	$>10^{-6}$	5.00	$>6.0 \times 10^4$
360	1×10^{-6}	4.50	6.0×10^4
600	4.78×10^{-7}	4.10	1.3×10^5
720	3.00×10^{-7}	3.80	2.0×10^5
870	1.68×10^{-7}	3.40	3.6×10^5
1140	9.4×10^{-8}	3.00	6.4×10^5
1380	5.3×10^{-8}	2.60	1.1×10^6
1560	4.52×10^{-8}	2.50	1.3×10^6
1800	3.82×10^{-8}	2.40	1.6×10^6
2040	1.95×10^{-8}	2.00	3.1×10^6
2280	1.05×10^{-8}	1.70	5.7×10^6
2760	6.7×10^{-9}	1.50	9.0×10^6
3120	3.07×10^{-9}	1.20	2.0×10^7

注: 罗丹明-B用量6kg, 溶液体积100L, 初始浓度为 6.0×10^{-2} g/ml

表 2 1985 年 11 月 7 日下午扩散实验中罗丹明-B 的浓度变化及稀释因子
 Tab. 2 Variation of Rhodamine-B Concentration and D.F Value with time in
 Diffusion Experiment on Nov.7,Pm, 1985.

相距时间 (s)	浓度 (g/ml)	荧光计输出测量值 (V)	D. F 值
180	$>10^{-6}$	5	$>6 \times 10^4$
270	$>10^{-6}$	5	$>6 \times 10^4$
390	2×10^{-6}	4.78	3×10^4
570	6.2×10^{-7}	4.26	1×10^5
780	3×10^{-7}	3.80	2×10^5
930	1.92×10^{-7}	3.50	3.1×10^5
1080	1.37×10^{-7}	3.20	4.38×10^5
1200	9.4×10^{-8}	3.00	6.4×10^5
1320	8.1×10^{-8}	2.90	7.4×10^5
1470	4.52×10^{-8}	2.50	1.3×10^6
1590	3.28×10^{-8}	2.30	1.8×10^6
1710	1.95×10^{-8}	2.00	3.1×10^6
1860	1.3×10^{-8}	1.80	4.6×10^6
2040	1.05×10^{-8}	1.70	5.7×10^6
2160	8.4×10^{-9}	1.60	7.1×10^6
2310	5.3×10^{-9}	1.40	1.1×10^7
2460	3.03×10^{-9}	1.20	2.0×10^7
2760	3.45×10^{-9}	1.24	1.7×10^7

注: 罗丹明-B 用量为 3kg, 溶液体积为 50L, 初始浓度为 6.0×10^{-2} g/ml。

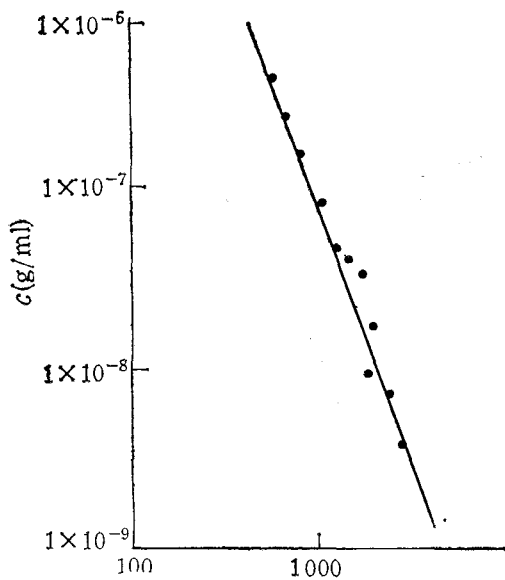


图 3 1985 年 11 月 7 日上午实验
 $\log c - \log t$ 关系曲线

Fig. 3 Relationship curve of $\log c - \log t$ in
 Experiment on Nov. 7, Am, 1985

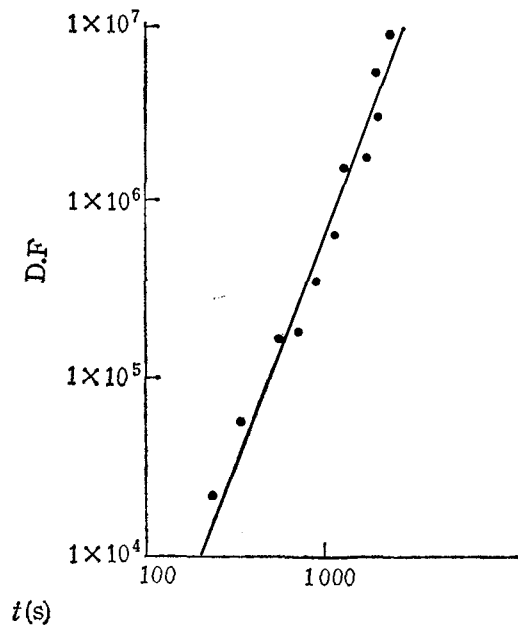


图 4 1985 年 11 月 7 日上午实验
 $\log D.F. - \log t$ 关系曲线

Fig. 4 Relationship curve of $\log D.F. - \log t$ in
 Experiment on Nov. 7, Am, 1985

表 3 1985 年 11 月 5—11 日气象资料

Tab. 3 Meteorological Data on Nov. 5—11, 1985.

日 期	时间	指标	气温(°C)	气压 (cmHg)	风 向	风速 (m/s)
11.5	8.00		17.0	76.70	270	1.0
	10.00		17.0	76.70	270	1.0
	12.00		17.0	76.60	270	1.4
	16.00		19.0	76.50	270	1.0
11.6	8.00		14.5	76.70	0	0.8
	10.00		19.5	76.75	30	2.0
	12.00		20.0	76.65	30	2.8
	16.00		24.0	76.50	60	2.0
11.7	8.00		17.0	76.55	60	1.5
	10.00		17.0	76.50	60	2.0
	12.00		17.5	76.40	60	2.3
	16.00		17.0	76.35	65	0.4
11.8	8.00		8.0	76.70	210	4.8
	10.00		10.0	76.80	240	4.2
	12.00		11.0	76.70	240	3.2
	16.00		8.0	76.70	240	1.2
11.9	8.00		11.0	76.90	100	2.0
	10.00		12.0	76.90	240	0.5
	12.00		13.0	76.80	240	1.7
	16.00		14.0	76.55	240	2.2
11.10	8.00		14.0	76.60	240	1.2
	10.00		14.0	76.60	240	1.8
	12.00		15.0	76.40	240	1.8
	16.00		14.5	76.20	240	静风
11.11	8.00		11.0	76.40	270	0.4
	10.00		13.0	76.50	270	0.4
	12.00		13.0	76.50	270	2.6
	16.00		16.5	76.40	240	2.2

回归分析,各得到很理想的直线,图 3—6 是对两次平流扩散实验的回归分析曲线。

第一次实验

$$c_1 = a_1 t^{-2.8}$$

$$\log c_1 = K_1 - 2.8 \log t_1$$

$$\log (D. F)_1 = K(D. F)_1 + 2.7 \log t_1$$

第二次实验

$$c_2 = a_2 t_2^{-3.1}$$

$$\log c_2 = K_2 - 3.1 \log t_2$$

$$\log (D. F)_2 = K(D. F)_2 + 3.0 \log t_2$$

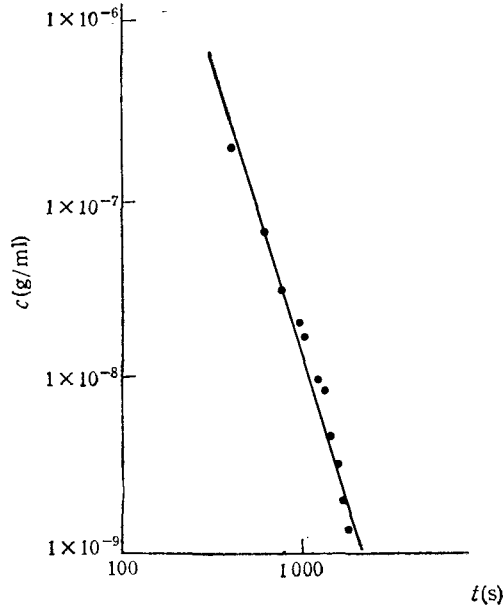


图5 1985年11月7日下午实验
log c-log t 关系曲线

Fig. 5 Relationship curve of log c-log t in
Experiment on Nov. 7, Pm, 1985

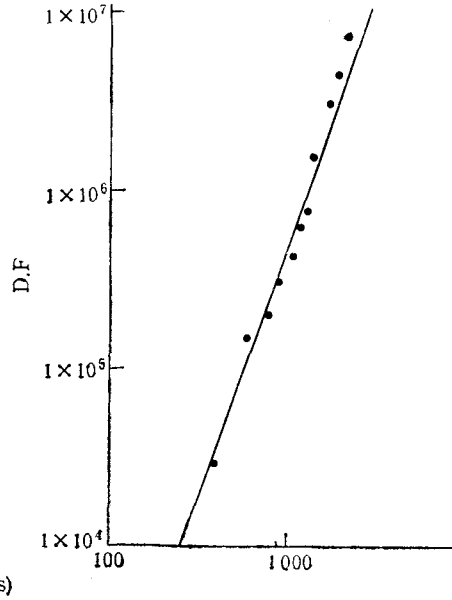


图6 1985年11月7日下午实验
log D.F.-log t 关系曲线

Fig. 6 Relationship curve of log D.F.-log t in
Experiment on Nov. 7, Pm, 1985

将前两次斜率平均可以用下式表示

$$\log c = K - 2.9 \log t$$

3. 扩散系数

根据我们的实测资料和抛放罗丹明-B方式, 初步确定扩散系数可用下述数学模式进行计算

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_x \frac{\partial c}{\partial x} + u_y \frac{\partial c}{\partial y} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right)$$

其解为

$$c = \frac{M}{4\pi Dt} \exp \left[\frac{-(x - \bar{u}t)^2 - y^2}{4Dt} \right]$$

c 为色团中心部分的浓度 (g/m^3); M 为抛放罗丹明-B的量 (g), 在二维解中是面源; D 为扩散系数 (m^2/s); \bar{u} 为流速; x 为测点到抛放点的距离 (m); t 为时间 (s)。

在实验期间, 其样品测点是在云团中心部分进行的, 并且测量船随水流而运动, 故 x , \bar{u} 和 y 均为 0, 因而上式可简化为

$$c = \frac{M}{4\pi Dt} e^0 = \frac{M}{4\pi Dt} \quad \text{或} \quad D = \frac{M}{4\pi ct}$$

利用公式所得扩散系数见表 4。从表 4 看出, 第一次实验的平均 D 值为 $1.16(\text{m}^2/\text{s})$; 第二次实验的平均 D 值为 $1.29(\text{m}^2/\text{s})$; 两次平均值为 $1.23\text{m}^2/\text{s}$ 。这两次实验的条件相似, 所得结果也相似。可以认为在一般天气情况下, 九江水段水体的扩散系数为 $1.23\text{m}^2/\text{s}$ 。

表 4 九江段江水扩散系数

Tab. 4 Diffusion Coefficient of water mass in Jiujiang River segment

实验次数	$t(s)$	$D(m^2/s)$	平均值 (m^2/s)
第一次	1140	0.45	1.16
	1380	0.65	
	1560	0.68	
	1800	0.69	
	2040	1.20	
	2280	1.90	
	2760	2.58	
第二次	1590	0.46	1.29
	1710	0.70	
	1860	0.99	
	2040	1.06	
	2160	1.32	
	2310	1.95	
	2760	2.54	
平均			1.23

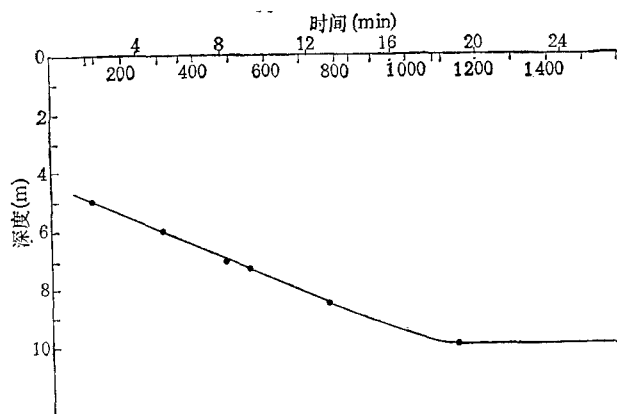


图 7 示踪染料下沉深度与扩散时间和扩散距离的关系

Fig. 7 Relationship between depth of sink of Rhodamine-B and diffusion time as well as distance

4. 九江河段罗丹明-B 的下沉、垂直变化及浓度分布

实验的目的是为了解外贸扩建码头产生的表层污染物能否对九江取水口产生影响。

(1) 罗丹明-B 的下沉和污染尺度 图 7 是罗丹明-B 进入水体之后下沉的情况。可以看出：在 2min 之后罗丹明-B 即可下沉到 5m 左右的深度、在 19min 之后便可以进入到底层，影响的尺度达到 1 100 多米。从图 7 可以看出示踪体的下沉是有规律的。实

验表明九江外贸码头产生的表层污染物质(可溶性物质)对取水口是有一定影响的。对于船舶排放油性污水,一般只分布在表层几个厘米,故外贸码头产生的油性物质不会进入取水口。

(2) 罗丹明-B 的垂直分布 图 8 是 1985 年 11 月 10 日下午所进行实验的部分结果

从图 8(1,2) 看出: 在罗丹明-B 抛放 14min 之后, 仍然保持着梯度分布的特点, 从底层向表层逐步上升, 即从底层的 10^{-8} 变化到表层的 10^{-7} , 在荧光计下降过程中, 浓度从高变低, 即从 10^{-7} 变化到 10^{-8} 。虽然前后几分钟有一定差别, 但规律相似。出现差别的原因主要是在测定过程中, 污染物质发生了运动, 即仪器下降时测定的水体已不是上升时的水体。

图 8(3,4) 是在示踪体抛放 21min 之后的情况, 其浓度的垂直变化仍然在上下层之间有一梯度, 但已明显减少, 8m 以上已基本混合均匀。用荧光计从上向下测量时, 浓度波动较大, 这种高低波动的现象, 是因为两次测定的水体并不完全一样, 两者前后相差 2min。

图 8(5,6) 是在示踪体抛放 55min 之后测定的结果。与前者不同, 上下层之间的梯度已完全消失, 表明水体的混合已很充分, 污染物质呈均匀分布状态。

从以上结果得知, 在污染物质进入江水之后的较短时间内 (20min), 从上至下存在一个浓度差, 随着时间的推移, 这种差别逐步消失, 并且最后达到均匀分布状态。从达到均匀分布状态的时间来看, 在九江港区只不过 50min。可见该区的扩散能力是很大的。

(3) 影响污物下沉和扩散的因素 九江河段江水的混合是良好的, 罗丹明-B 的下沉是很快的, 其原因可能有两个:

A. 水流梯度的存在

测定表明, 江水上、中、下层的流速是有明显差别的, 上层可为下层流速的 1—3 倍(见表 5)。

很显然, 上下层水体之间会因流速不同而产生一定的剪切力, 在平动过程中, 上部水体的能量逐步向下层传递, 这种过程的延续必然产生程度不同的螺旋式的涡动, 从而加速上层物质向下层的运动。除垂直方向上存在流速梯度外, 从岸边向江心延伸也存在流梯度, 这种流梯度也能产生有利于物质扩散的涡旋。

B. 流速的影响 实测时流速为 0.22—0.80cm/s, 在这种水体的快速运动过程中, 污染物质可以随水体运动搬运到很远的距离。从水体的快速运动可以获得相当的扩散能量, 能量愈大, 涡旋的尺度也愈大, 扩散和下沉速度也愈快。

C. 港区的人为活动 各种船只的活动都不断地给水体以能量, 形成大小不一的波

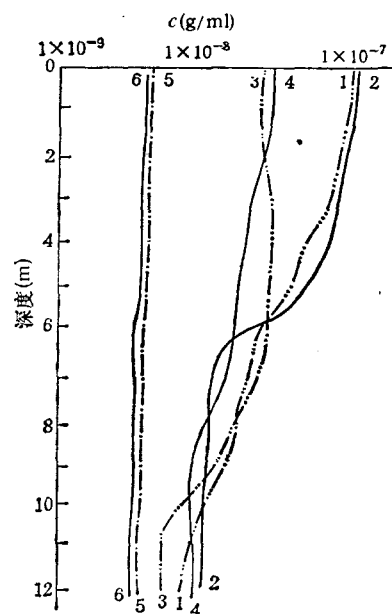


图 8 罗丹明-B 的垂直分布
Fig. 8 Vertical distribution of Rhodamine-B in river water

表 5 1985 年 11 月 11 日九江新港区测流记录

Tab. 5 Current speed in New Port region in Jiujiang River segment. on Nov. 11, 1985.

地 点	时 间	水 深 (m)				
		-2	-4	-6	-8	-10
		流 速 (m/s)				
二区船坞	14:30	70	60	52	52	31
二区船坞	16:0	70	56	54	41.5	22
取水日浮标	14:42	80	75	64	64	62

浪,表层水体的这种状态也有利于物质的扩散和下沉。

D. 天气条件 实验时均有 2m/s 的风速,见表 3。

在风与表层水摩擦时,将能量传递给水分子,从而更加促进了上下层水体的交换,并使污染物很快达到均匀分布。

四、初步看法

1. 用罗丹明-B 作为示踪体研究长江水体的扩散规律是可行的,拖曳式水中荧光计是进行扩散研究的先进设备。

2. 九江外贸码头及其下游区是顺直河段,水流是沿着一条直线移动的,其速度平均为 0.5m/s, 6kg 的罗丹明-B 的扩散范围为 3240m。

3. 在良好的天气状况下(4 级风以下),江水的扩散仍是很快的,经 40min, 其 D.F 值可以从 10^2 到 10^9 , 变化了 7 个量级。因此,在非正常情况下(大风或船只搅动等),扩散速度更快,经过十几分钟即可达到 6—7 个量级的变化,一般污染物排入江水之后,很快就会经过一个缓冲区而稀释到水质标准之下,初步认为正常的少量排污不会造成江水的严重污染。

4. 罗丹明-B 在九江段水域中浓度的变化与时间的 2.9 次方成反比,其回归式为:

$$\log c = K - 2.9 \log t$$

这一相关表明: $\log c$ 与 $\log t$ 呈直线关系,并且浓度的衰减非常迅速。

5. 九江河段的扩散系数平均为 $1.23\text{m}^2/\text{s}$, 表明其扩散比某些海湾快得多。

6. 实测水流速度存在一定的梯度,因此,能形成涡流,从而加强了上下层的交换,并加快污染物质的下沉和均匀化速度。实验表明:可溶性污染物质在 5 分钟时间即可影响到取水口,因此,九江外贸码头排污需要加以限制。

参 考 文 献

- [1] 李培泉等编著,1983. 海洋放射性及其污染. 科学出版社, 1—400 页。
- [2] 李培泉、张法高、卢光山等,1984. 渤海湾海水扩散规律的研究. 海洋与湖沼 15(2): 117—126。
- [3] 张法高,1980. 表层 Ekman 剪切流场中瞬时点源扩散. 海洋与湖沼 11(4): 1—6。
- [4] 凌备备,1980. 中国近海区小尺度湍流扩散规律的研究. 海洋与湖沼 11(1): 1—10。
- [5] Fischer H. B., E.J.List et al., 1979. Mixing in inland and Coastal Water. Academic Press, 1—483.

STUDY ON THE DIFFUSION OF THE POLLUTANT IN JIUJIANG SEGMENT OF CHANGJIANG RIVER*

Li Peiquan

(*Institute of Oceanology, Academia Sinica, Qingdao*)

Miao Lutian

(*Qingdao Harbour Administration Bureau*)

Xia Daying

(*First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao*)

and

Wang Xinyu

(*Environmental Protection Bureau of Jiujiang City*)

ABSTRACT

Study on the diffusion of the pollutant in Changjiang river with Rhodamine-B as tracer have been carried out by using autowater-fluorimeter (LGC₁-1A) developed by the authors.

1. The Jiujiang port and its downstream is a straight river segment and water flow with a mean speed of about 0.5 m/s. The scale of the diffusion for 6 kg Rodamine-B is 3240 m.

2. The diffusion of the pollutant is still rapid even though the weather is fine (under moderate breeze). The D. F values vary from 10^2 — 10^9 in 40 minutes. When there is strong breeze or water is disturbed by the ship, the diffusion speed of the pollutant is more rapid. The change of the order of magnitude is 6—7 in more ten minutes after the pollutant is discharged into the river. It shows that the pollutant is soon diluted below the standard of water quality and serious pollution does not happen when the less pollutant is discharged.

3. The changing of the concentration of Rhodamine-B in Jiujiang segment is an inverse measure of $t^{2.9}$. The regression equation shows

$$\log c = K - 2.9 \log t$$

which indicates that the relationship between $\log c$ and $\log t$ is a straight line and the concentration of pollutant decreases rapidly.

4. The diffusion coefficient of river water is about 1.23 m²/s in Jiujiang segment. It shows that the diffusion speed of river water is in generally more rapid than that of sea water. The diffusion speed can be increased due to the disturb of the ship, so the diffusion coefficient at this condition can also be increased, but this diffusion speed and coefficient is not representative of fresh water in Jiujiang segment.

5. There exists a gradient for water current speed in Jiujiang segment, so the eddy current can be formed and the exchanging of water or pollutant between the surface and the deep is enhanced. The sink and well-distribution of the pollutant in freshwater is accelerated. The experiment indicates that the soluble pollutant can reach the drinking water channel for the residents of Jiujiang city in 5 minutes, so the discharge of pollutant in foreign trade port segment must be limited.

* Contribution No. 1705 from the Institute of Oceanology, Academia Sinica.