

近岸水域中污染羽流的运动 及访问频率场模型

黄河宁 王发君

(国家海洋局海洋环境保护研究所,大连 116023)

提要 本文研究了由污水排海工程污水扩散器排放污水形成的污染羽流在近岸水域中的运动及访问频率场模型。在对 Churchill 羽流运动模拟法改进的基础上,提出了羽流分片模拟法。本方法利用质量守恒原理给出了其变化关系,并采用连续释放质点追踪法计算羽流的运动路径。考虑到非保守性物质的衰减,给出了相应的计算羽流宽度的公式。对大连市黑石礁污水排海工程方案A污染羽流(以大肠杆菌作为污染指标物)访问频率场的计算表明:访问频率场对于污水排海工程环境影响预测评价和最优排污点的选择具有十分重要的意义。

关键词 访问频率 污染羽流 质点追踪

为了评价污染羽流侵入水域的环境质量,Csanady 在1983年提出访问频率场模型^[1],该模型假定污染羽流是由一系列云斑组成,云斑的宽度(羽流宽度)保持为常数,云斑的迁移路径是直线。1986年 Churchill^[2]对 Csanady 方法进行了改进,污染羽流的宽度不再假定为常数,云斑的迁移路径也不假定为直线。增加的假定是:污染羽流中污染物的浓度在横向为高斯分布,并给出了羽流宽度的合适定义。然而,Churchill 却忽略了这样一个事实:由于流场在空间和时间上是变化的,污染羽流中污染物质量分布密度(即在垂向和纵向单位面积上的污染物质量 Q)沿着污染羽流的中线应是变化的。这样在计算污染羽流宽度的公式中, Q 不应设为常数。

本文对 Churchill 的羽流运动模拟法进行了改进,提出了羽流分片模拟法。该法利用质量守恒定律,给出了分片上 Q 的变化关系;并根据欧拉场与拉格朗日场之间的关系,采用连续释放质点追踪法计算污染羽流的运动路径。这种方法比 Churchill 采用的倒积分方法更为严谨。在本文的方法中还考虑了非保守性物质的衰减,而在 Csanady 和 Churchill 的方法中都只考虑了保守性物质。

一、基本概念和假定

由于污染羽流的运动是与流体运动的拉格朗日场相联系的,因此,污染羽流访问频率场模型本质上是一种拉格朗日模型。这里,污染羽流定义为由规定的边界浓度值所包围的污染水体的体积,它具有有限的宽度并随时间和空间变化。边界浓度值可以取为所保

护水域水质目标规定的某种污染物的浓度值。假定污染羽流在垂向为均匀混合,即污染羽流或者是占据了整个水柱,或者是局限在某一特定水层中(如表层混合层或密度跃层),因此整个运动只在水平面发生。对于接近于中性浮力的污染物,在它初始混合后的最初几个小时内,这是一种合理的理想化的假定^[2]。

在所考虑的区域某一点处的访问频率定义为污染羽流占据该点的时间与整个模拟时间(所考虑的时间尺度)之比。等访问频率线即构成污染羽流访问频率场。

应用羽流分片模拟法计算访问频率场的关键是计算每一时刻污染羽流的运动路径和宽度,下面将给予详细论述。

二、污染羽流运动路径的模拟

考虑在近岸水域中的一个离岸排污口连续排放污水,形成细长的污染羽流。显然,在某一时刻 τ , 污染羽流中线上的各点即为在 $0 \leq t \leq \tau$ 时段内,从排污口释放的标识质点在 τ 时刻的位置。因此,污染羽流在 τ 时刻的路径,可以由在 $0 \leq t \leq \tau$ 时段内释放的标识质点的位置的连线来得到。这样模拟污染羽流运动路径的问题便转化为对连续释放的质点的追踪问题。因此称其为连续释放质点追踪法。在实际计算中,需要将 $0 \leq t \leq \tau$ 时段离散成许多小时段 Δt , 如果取 Δt 相同,则 $\tau = n\Delta t$ 。相应地,这时污染羽流的中线成为依次连接的折线,而整个污染羽流由依次连接的分片组成,分片的数目即为 n 。

用于质点追踪计算的流场一般由现场海流观测得到^[2,4],数值模拟的流场也可以应用。然而,这两种方法得到的流场都是欧拉场,需要借助于如下的欧拉-拉格朗日方法进行质点追踪计算。将计算区域划分成网格, x 轴取为正东向, y 轴取为正北向。

在 $t = t_0$ 时刻位于位置 \vec{r}_0 的标识质点,其拉格朗日速度 \vec{U}_l 与欧拉速度 \vec{U}_e 有如下的关系:

$$\vec{U}_l(\vec{r}_0, t) = \vec{U}_e[\vec{r}(\vec{r}_0, t), t] \quad (2.1)$$

式中, $\vec{r}(\vec{r}_0, t)$ 为标识质点的运动轨迹,式(2.1)表明,只有在质点运动轨迹上,拉格朗日速度才与欧拉速度相等。 \vec{r} 由下式确定:

$$\vec{r}(\vec{r}_0, t) = \vec{r}_0 + \int_{t_0}^t \vec{U}_e(\vec{r}, t') dt' \quad (2.2)$$

式中的积分需沿着质点运动轨迹进行,这就要求在计算中考虑 \vec{U}_e 随 \vec{r} 的变化。

取时间步长为 Δt , 则(2.2)式可以写成离散形式:

$$\vec{r}(\vec{r}_0, t) = \vec{r}_0 + \sum_{i=0}^{n-1} \int_{t_0+i\Delta t}^{t_0+(i+1)\Delta t} \vec{U}_e(\vec{r}, t') dt' \quad (2.3)$$

$$\int_{t_0+i\Delta t}^{t_0+(i+1)\Delta t} \vec{U}_e(\vec{r}, t') dt' = \left\{ \vec{U}_e[\vec{r}(\vec{r}_0, i\Delta t), (t_0 + i\Delta t)] + \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{d\vec{U}_e}{dt} \right)_{t_0+i\Delta t} \right\} \Delta t \quad (2.4)$$

式中, $d\vec{U}_e/dt$ 为欧拉-拉格朗日变换中定义的实质导数。

取排污口为坐标原点,则 $\vec{r}_0 = 0$, 并从 $t_0 = 0$ 时开始计算,则对于 $t = \tau = n\Delta t$ 时刻,污染羽流中线折线上第 m 个端点位置的计算公式为:

$$\vec{r}_m(0, \tau) = \sum_{i=m}^{n-1} \int_{i\Delta t}^{(i+1)\Delta t} \vec{U}_e(\vec{r}, t') dt' \quad m = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (2.5)$$

$$\int_{i\Delta t}^{(i+1)\Delta t} \vec{U}_e(\vec{r}, t') dt' = \left\{ \vec{U}_e[\vec{r}(i\Delta t), i\Delta t] + \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{d\vec{U}_e}{dt} \right)_{i\Delta t} \right\} \Delta t \quad (2.6)$$

式中, $m = 0$ 对应于污染羽流中线上最远端的端点, $m = n - 1$ 对应于最靠近污染源的端点。

根据式(2.5)和式(2.6)求出各个端点位置后, 依次连续相邻的端点, 即得到 τ 时刻污染羽流的运动路径。

三、污染羽流宽度计算

考虑到 $t = \tau$ 时刻污染羽流中某一污染指标物的浓度分布, 假定在每一分片内, 垂向浓度分布均匀, 纵向浓度分布相似, 而横向浓度分布为高斯函数形式:

$$C(\varepsilon, \tau) = \frac{Q(\tau)}{\sqrt{2\pi\sigma(\tau)}} \exp\left(\frac{-\varepsilon^2}{2\sigma^2(\tau)}\right) \cdot \exp(-\lambda\tau) \quad (3.1)$$

式中, ε 为垂直于污染羽流中线的横向坐标; $Q(\tau)$ 为保守性污染物质量分布密度, 即在羽流垂向和纵向单位面积上污染物的质量; $\sigma(\tau)$ 为浓度分布标准差; λ 为衰减系数, $\lambda = 0$ 为保守性物质, $\lambda > 0$ 时为非保守性物质。 $Q(\tau)$ 满足:

$$Q(\tau) \cdot e^{-\lambda\tau} = \int_{-\infty}^{\infty} C(\varepsilon, \tau) d\varepsilon \quad (3.2)$$

式(3.1)是基于 Csanady^[3] 和 Murthy^[6] 的研究而建立的, 并为 Churchill^[2] 所采用 (只是未考虑衰减项)。

设污染羽流边界浓度为 C_B , 则羽流的宽度 $W(\tau) = 2\varepsilon_B(\tau)$, $\varepsilon_B(\tau)$ 满足:

$$C_B(\varepsilon_B, \tau) = \frac{Q(\tau)}{\sqrt{2\pi\sigma(\tau)}} \exp\left(\frac{-\varepsilon_B^2(\tau)}{2\sigma^2(\tau)}\right) \exp(-\lambda\tau) \quad (3.3)$$

由式(3.3)可以解出 $\varepsilon_B(\tau)$, 得到污染羽流的宽度为:

$$W(\tau) = 2\varepsilon_B(\tau) = 2^{3/2}\sigma(\tau) \left\{ \ln\left(\frac{Q(\tau)}{\sqrt{2\pi}C_B\sigma(\tau)}\right) - \lambda\tau \right\}^{1/2} \quad (3.4)$$

由式(3.4)可以看出, 污染羽流的宽度在排放后的开始阶段随时间增长, 达到某一极值后随时间衰减。

式(3.1)中的 $\sigma(\tau)$ 可由染料实验来确定。Okubo 等^[7]于 1980 年 7 月和 1981 年 5 月在美国长岛附近所做的染料实验表明, 在表层混合层中, $\sigma(\tau)$ 随时间线性增长, 即:

$$\sigma(\tau) = \sigma(0) + \omega_D\tau \quad (3.5)$$

式中, $\sigma(0)$ 为初始标准差; ω_D 通常定义为扩散速度。根据 Okubo 等^[7]的资料所确定的 ω_D 值分别为 0.5cm/s (1980 年 7 月)和 0.75cm/s (1981 年 5 月), 而 Kullenberg^[5]给出 ω_D 的范围为 0.5—1.5cm/s。

在应用式(3.4)计算污染羽流的宽度时, 首先需要确定初始值 $Q(0)$ 和 $\sigma(0)$ 。在初始稀释阶段末, 污水场中污染物浓度在横向基本上是均匀分布, 即近似于所谓大帽子(钟

形)分布,则 $Q(0)$ 和 $\sigma(0)$ 分别由下式确定:

$$Q(0) = C_1 W(0) \quad (3.6)$$

$$\sigma(0) = 0.2887W(0) \quad (3.7)$$

式中, C_1 为污水场中某一污染场的初始浓度; $W(0)$ 为污水场初始宽度。 C_1 和 $W(0)$ 都需要根据近场初始稀释计算来得到。关于水面污水场初始稀释的计算可参见 Roberts^[8] 的论文。

由于 C_1 和 $W(0)$ 是污水排放时当地流速、流向、水深、密度等环境条件的函数,因此,各个分片的 $Q(0)$ 是不同的。并且,在以后的运动中,由于流场的空间变化,同一分片的 $Q(t)$ 在不同时刻也可能不同。根据质量守恒原理,可以给出每一分片的 $Q(t)$ 在后一时刻 t_2 与前一时刻 t_1 的变化关系。

设某一分片在 $t = t_1$ 时刻中线长度为 l_1 , 在 $t = t_2 = t_1 + \Delta t$ 时刻, 中线长度为 l_2 , 注意到非保守性物质的衰减并不包括在 $Q(t)$ 中[见式(3.1)], 则由质量守恒定律, 有下面的关系成立:

$$Hl_1Q(t_1) = Hl_2Q(t_2) \quad (3.8)$$

式中, H 为分片的厚度, 为常数, 则由式(3.8)得到 $Q(t_2)$ 与 $Q(t_1)$ 的关系为:

$$Q(t_2) = \frac{l_1}{l_2} Q(t_1) \quad (3.9)$$

由式(3.4), (3.5), (3.6), (3.7)和(3.9), 即可以求出污染羽流中任一分片在 τ 时刻的宽度。

四、数值算例

根据上述方法, 计算了大连市黑石礁湾污水排海工程方案 A 污染羽流的访问频率场(以大肠杆菌作为污染指标物)。

该污水排海工程远期设计污水流量为 $12 \times 10^4 \text{t/d}$, 排海污水中大肠杆菌浓度为 10^8 个/L。排污点位于 -28m 处(海图深度), 离岸垂直距离约为 3300m , 污水扩散器设计长度为 150m 。

计算中取大肠杆菌衰减率 $\lambda = 0.5756$ (相应于 $T_{90} = 4\text{h}$)。羽流边界上大肠杆菌浓度取为海水浴场细菌学水质标准^[1], 即 $C_B = 10\ 000$ 个/L。取扩散速度 $\omega_D = 0.5\text{cm/s}$ 。计算区域(黑石礁湾)的流场由 1987 年在该区 11 个测流站位所获资料进行插值得到。在图 1 中显示了该方案污染羽流的访问频率场, 模拟时间 t_d 分别为 3, 6, 12 和 24h。

由图 1 可以看到, 访问频率场的范围随模拟时间 t_d 的增加而增大, 但 $t_d = 12\text{h}$ 和 $t_d = 24\text{h}$ 的访问频率场基本相同。这表明当 $t_d = 12\text{h}$ 时, 访问频率场已达到平衡状态, 由于羽流模型(即中场模型)适用的时间尺度为一个潮周期左右, 因此可以取 $t_d = 12\text{h}$ 的访问频率场作为环境影响预测评价的依据。必须指出, 对应于不同的计算条件和参数, 访问频率场达到平衡所需的时间将是不同的, 也有可能始终不能达到完全平衡状态(类似于所谓平衡浓度场实际上并非达到完全平衡一样)。

图 1 中最外圈等访问频率线的数值为 0.01, 其意义为污染羽流将有 1% 的时间会侵入这条线附近。换言之, 将有 1% 的时间(即相当于一天的 15min 或一个月中有 7 小时

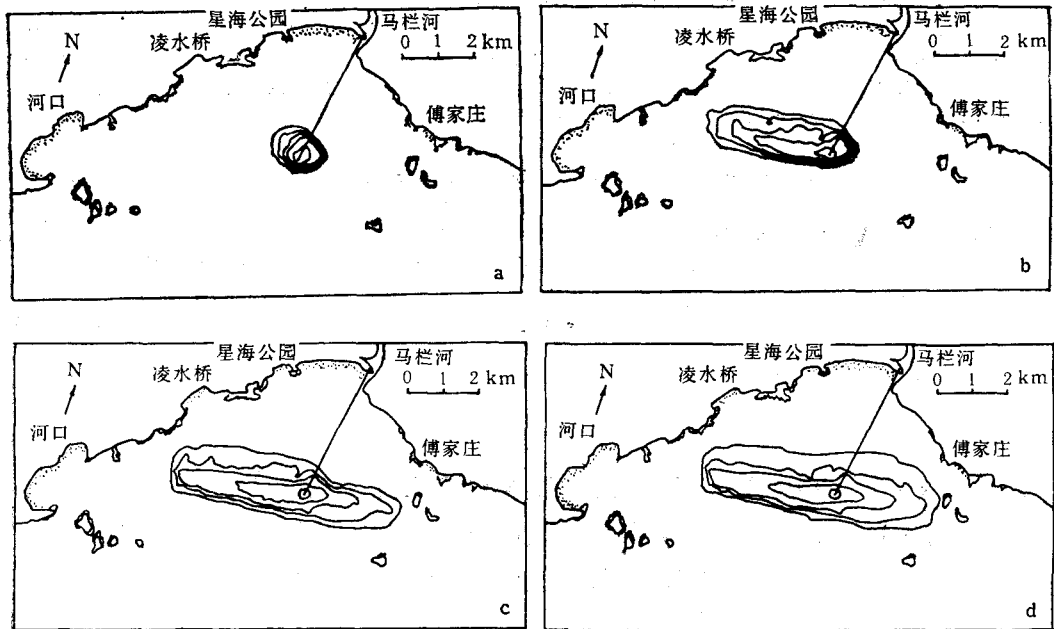


图1 大连市黑石礁湾污水排海工程方案A污染羽流访问频率场

Fig.1 Visitation frequency fields of contaminant plume for the Alternative A of the sea outfall in Heishijiao Bay, Dalian

a. $t_d = 3h$; b. $t_d = 6h$; c. $t_d = 12h$; d. $t_d = 24h$ 。以大肠杆菌作为污染指标物,
 $T_{90} = 4h$, $C_B = 10000$ 个/L。

半),该线附近大肠杆菌的浓度将超过 10000 个/L。显然,根据图 1 中的访问频率场可以得出判断:岸边海水浴场(星海公园和傅家庄)水域将不会出现大肠杆菌超标。

五、结 论

在对 Churchill^[2] 的羽流运动模拟法改进的基础上,提出了羽流分片模拟法,本方法的特点及其与 Churchill 方法的主要不同是:

1. 在每一分片上,污染物质量分布密度 Q 是不同的,并且由于流场在空间上和时间上的变化,在同一分片上 Q 也是变化的,根据质量守恒原理,给出了 Q 的变化关系。
2. 根据欧拉场和拉格朗日场之间的关系,采用连续释放质点追踪法计算污染羽流的运动路径,比以往采用的倒积分法更为严谨。
3. 模型中考虑了非保守性物质的衰减,给出了相应的计算羽流宽度的公式。

对大连市黑石礁湾污水排海工程方案A污染羽流访问频率场的计算表明,访问频率场能够直观地显示污染羽流中某污染物影响的水域面积和时间,它对于污水排海工程环境影响预测评价和最优排污点的选择具有重要的意义。

参 考 文 献

- { 1 } 国务院环境保护领导小组,1986,中华人民共和国国家标准——海水水质标准。海洋出版社,1—2。
- { 2 } Churchill, J. H., 1986, Assessing Hazards due to Contaminant discharge in Coastal Waters, Woods Hole

- Oceanographic Institution, Report Number 6011, pp. 1—26.
- [3] Csanady, G. T., 1966, Dispersal of foreign matter by current and eddies of the Great Lakes, *In* University of Michigan Great Lakes Research Division Publication No. 15, Ann Arbor, Michigan, pp. 283—294.
- [4] Csanady, G. T., 1983, Dispersal by randomly varying currents, *J. Fluid Mech.*, **132**: 375—394.
- [5] Kullenberg, G., 1982, Physical process, *In* Pollutant Transfer and Transport in the Sea, Vol. 1, CRC Press, Boca Ration, Florida, pp. 1—89.
- [6] Murthy, C. R., 1972, Complex diffusion processes in coastal currents of a lake, *J. Phy. Oceanogr.*, **2**: 80—90.
- [7] Okubo, A., 1983, A Lagrangian and Eulerian Diffusion Study In the Coastal Surface Layers, SUNY, Maxine Sciences Research Center, Special Report 46, Reference 83-1, State University of New York, Stony Brook, New York, 295 pp.
- [8] Roberts, P. J. W., 1979, Line plume and ocean outfall dispersion, *J. Hydr. Div., ASCE*, **105**(HY4): 313—331.

A MODEL FOR PREDICTING MOTION AND VISITATION FREQUENCY OF CONTAMINANT PLUMES IN COASTAL WATERS

Huang Hening and Wang Fajun

(*Institute of Marine Environmental Protection, SOA, Dalian 116023*)

ABSTRACT

In this paper, the models for predicting motion and visitation frequency of the contaminant plumes emanating from the diffuser of the sea outfall in coastal waters are examined. Based on the improvement of the Churchill's plume motion simulation method, a plume segment simulation method is presented. The model considers the variation of the distribution density of the contaminant substance and gives its variation relation by means of the mass conservation principle. According to the transfer relationship between the Eulerian field and the Lagrangian field, the path of the plume is estimated by using the continuous release particle tracking method. The decay of the non-conservative substance is also considered in this paper, and the equation of estimating the plume width is given. The numerical examples for the Alternative A of the sea outfalls in Heishijiao Bay, Dalian, show that the visitation frequency field is a significant tool in assessing of the environment effects and in selecting the optimal discharge site of the sea outfall.

Key words Visitation frequency, Contaminant plumes, Particle tracking.