

# 河口港湾水体污染物迁移转化模式

## ——厦门港石油烃有限水体迁移和风化混合模型\*

张 珞 平      曾继业 吴瑜端

(厦门大学环境科学研究所)      (厦门大学海洋系)

**摘 要** 本文将有限水体迁移模式与生物、化学降解模式相结合,讨论了受潮汐控制的河口、港湾水体中污染物的迁移转化模式,并将模式应用于计算厦门港水体中石油烃含量的分布,其结果与现场调查基本吻合。

**关键词** 有限元 石油风化 混合模型

### 前 言

本文讨论了受潮汐控制的河口、港湾水体中污染物的迁移转化模式。

## 1 模式

对于受潮汐水动力控制的河口和半封闭的港湾,物质和能量的传输较为简单。用有限水体划分法<sup>[1]</sup>建立污染物的混合迁移模式<sup>[2]</sup>,其模式简单,计算量小,参数易于确定。若能将污染物的生物、化学作用合并考虑,建立污染物的物理、化学、生物迁移转化综合模式,则模式的准确性和适用性将大大提高。

### 1.1 有限水体混合迁移模式

将某个特定海域看成一个系统 $S$ ,根据海域的潮流、扩散和混合等特点将系统划分为 $n$ 个单元 $S_i$ ,则系统 $S$ 就是各单元 $S_i$ 的集合:

$$S = \{ S_i | i=1 \sim n \} \quad (1)$$

假设每个划分单元 $S_i$ 的理论性质是均一的,混合是理想的完全混合,则系统的状态,即物质的浓度分布可用浓度分布向量表示:

本文于1990-10-04收到,修改稿于1993-06-10收到。

• 国家自然科学基金资助项目。

$$C(t) = \begin{pmatrix} C_1(t) \\ \vdots \\ C_i(t) \\ \vdots \\ C_n(t) \end{pmatrix}. \quad (2)$$

设潮周期为 $T$ ,  $\Delta t = 1/2T$ 为半个潮周期. 令 $t_0$ 为某个低潮时, 则在第 $k$ 个高潮时 $t = t_0 + (k-1/2)T$ 的浓度分布 $C_i(k-1/2)$ 与第 $k-1$ 个低潮时 $t = t_0 + (k-1)T$ 的浓度分布有如下关系:

$$C_i(k-1/2) = \left\{ \sum_{j=1}^n q_{ij}^f C_j(k-1) \right\} / \left( \sum_{j=1}^n q_{ij}^f \right), \quad (3)$$

式中 $q_{ij}^f$ 为元 $S_j$ 在涨潮过程中输送给元 $S_i$ 的水量. 当 $j=i$ 时,  $q_{ij}^f$ 为水体自输入量或称残留量.

$$\text{令} \quad \lambda_{ij} = q_{ij}^f / \left( \sum_{j=1}^n q_{ij}^f \right) \quad (4)$$

为涨潮水体传输系数, 代入式(3)得:

$$C_i(k-1/2) = \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} C_j(k-1), \quad (5)$$

$$\text{则} \quad C(k-1/2) = \begin{pmatrix} C_1(k-1/2) \\ \vdots \\ C_n(k-1/2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_{11} & \cdots & \lambda_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ \lambda_{n1} & \cdots & \lambda_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_1(k-1) \\ \vdots \\ C_n(k-1) \end{pmatrix} = AC(k-1). \quad (6)$$

式中定义 $A = (\lambda_{ij})_{n \times n}$ 为涨潮水体传输系数矩阵. 同理可得低潮时的浓度分布 $C(k)$ 为

$$C(k) = \Gamma C(k-1/2). \quad (7)$$

式中, 定义 $\Gamma = (v_{ij})_{n \times n}$ 为退潮水体传输系数矩阵,  $v_{ij} = q_{ij}^r / \left( \sum_{j=1}^n q_{ij}^r \right)$ 为退潮水体传输系数,  $q_{ij}^r$ 为退潮时元 $S_j$ 对元 $S_i$ 的水体传输量.

式(6)、(7)即为有限水体混合迁移模式.  $q_{ij}^f$ 和 $q_{ij}^r$ 可由潮差及水体传输守恒条件或由界面潮流观测数据求得, 也可用数值计算获得.

若存在连续的污染源输入系统内, 令 $f_i^f$ 和 $f_i^r$ 分别为涨潮和退潮期间输入元 $S_i$ 的污染物在 $S_i$ 中产生的浓度增量, 荷载分布向量 $F^f = (f_i^f)_{n \times 1}$ 和 $F^r = (f_i^r)_{n \times 1}$ 分别为 $f_i^f$ 和 $f_i^r$ 的集合. 则系统在高、低潮时的浓度分布应为

$$C(k-1/2) = \begin{pmatrix} C_1(k-1/2) \\ \vdots \\ C_n(k-1/2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_{11} & \cdots & \lambda_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ \lambda_{n1} & \cdots & \lambda_{nn} \end{pmatrix} \left[ \begin{pmatrix} C_1(k-1) \\ \vdots \\ C_n(k-1) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} f_1^f \\ \vdots \\ f_n^f \end{pmatrix} \right] \\ = A[C(k-1) + F^f], \quad (8)$$

$$C(k) = \Gamma [C(k-1/2) + F^r]. \quad (9)$$

## 1.2 迁移转化混合模式

尽管生物和化学作用对污染物的去除作用有可能比水体迁移作用小得多,但当污染物的输入与水体的迁移达到稳态时,生物和化学作用对降低稳态平衡时的浓度起着举足轻重的作用.因此,将生、化模式与水体迁移模式结合,才能使模型更真实、准确地体现污染物的分布状况.

污染物的生物、化学降解作用通常是污染物初始浓度、降解常数、时间及其他有关物质浓度的函数,即 $C_i(t_2)=f[C_i(t_1), K_i, \Delta t, C_{0i}]$ . 温度、压力、盐度、光照等条件通常对降解常数有所影响.若在有限水体模式中,令 $\Delta t=T/2$ ,并以 $C'_i(t_2)=f[C_i(t_1), K_i, C_{0i}]$ 代表 $C_i(t_1)$ 在经历 $T/2$ 时间被降解后的浓度,则有

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{C}'(k-1/2) &= \begin{pmatrix} C'_1(k-1/2) \\ \vdots \\ C'_n(k-1/2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f[C_1(k-1), k_1, C_{01}] \\ \vdots \\ f[C_n(k-1), k_n, C_{0n}] \end{pmatrix}, \\ \mathbf{C}(k-1/2) &= \mathbf{A}[\mathbf{C}'(k-1/2) + \mathbf{F}^f], \\ \mathbf{C}'(k) &= \begin{pmatrix} C'_1(k) \\ \vdots \\ C'_n(k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f[C_1(k-1/2), k_1, C_{01}] \\ \vdots \\ f[C_n(k-1/2), k_n, C_{0n}] \end{pmatrix}, \\ \mathbf{C}(k) &= \mathbf{A}[\mathbf{C}'(k) + \mathbf{F}^f]. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式(10)即为水体迁移转化混合模式方程组.式中 $C'_i(t_2)=f[C_i(t_1), K_i, C_{0i}]$ 可根据各种不同污染物的降解函数关系确定.

由给定的初始状态 $\mathbf{C}(t_0)$ ,通过对式(10)方程组的反复运算,可得到在污染物输入、水体迁移和生物、化学转化各种作用下经 $k$ 次潮周期后系统达稳态时的高潮和低潮的浓度分布向量 $\mathbf{C}(k-1/2)$ 和 $\mathbf{C}(k)$ .

## 2 厦门港石油烃迁移和风化混合模型

### 2.1 厦门港有限水体迁移模型

根据厦门西海域的地理分布及潮流迁移、扩散等特点将厦门港划分为10个区域(图1).其中 $S_{10}$ 是九龙江河口区, $S_9$ 是外海.根据文献[2]、[3]取厦门港水体交换率为0.30.为了计算上的方便,将外海分为两个虚设元:其一为 $S_8$ ,在退潮时输入外海,而在涨潮时又返回湾内的那部分水体(70%)及其载带的物质输入 $S_9$ ;其二是在涨潮时不再返回的另一部分水体(30%)及物质输入 $S_{11}$ , $S_{11}$ 的容量无穷大,物质浓度恒定.

厦门港基本为正规半日潮,平均潮差4.0m,

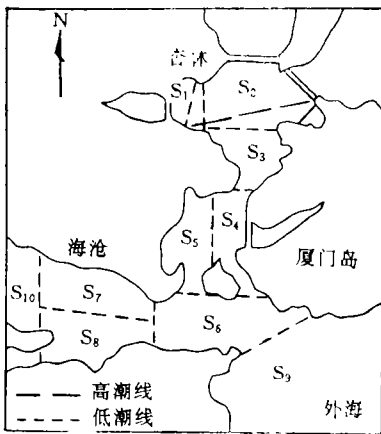


图1 厦门港海域有限水体划分

取 $\Delta t = T/2 = 6.2\text{h}$ . 由潮差、潮流及地形特征计算出各元 $S_i$ 的基本水文参数(表1)及水体传输量 $q_{ij}^f$ 和 $q_{ij}^r$ (表2、3). 由于 $S_1$ 和 $S_2$ 低潮时有大片滩涂, 且水体迁移、混合及扩散条件均较差, 我们对 $S_1$ 、 $S_2$ 和 $S_3$ 采用活动边界法(图1), 使得 $S_1$ 和 $S_2$ 的水体交换量占其低潮水容量的0.3和0.5. 由 $q_{ij}^f$ 和 $q_{ij}^r$ 可得到模式的水体传输系数矩阵 $A$ 和 $F$ .

表1 厦门港有限水体划分基本参数

	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$	$S_8$	$S_9$	$S_{10}$	$S_{11}$
平均水深(m)	—	—	6.5	10.0	8.0	15.0	6.0	6.0	—	—	—
低潮	4.3	14.0	9.0								
面积(km <sup>2</sup> )				9.4	9.4	20.0	16.0	15.0	—	—	—
高潮	2.7	11.0	13.6								
低潮水容量( $10^7\text{m}^3$ )	0.92	1.51	5.85	9.4	7.52	30.0	9.6	9.0	0.001	$\infty$	$\infty$
涨潮水交换量( $10^7\text{m}^3$ )	0.28	0.75	8.45	3.76	3.76	8.0	6.4	6.0	27.08	0.40	9.92
退潮水交换量( $10^7\text{m}^3$ )	0.28	0.75	8.45	3.76	3.76	8.0	6.4	6.0	27.08	1.28	11.6

表2 涨潮水体传输量 $q_{ij}^f$ ,

(单位:  $10^7\text{m}^3$ )

$S_i$	$S_j$										
	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$	$S_8$	$S_9$	$S_{10}$	$S_{11}$
$S_1$	0.92	0.28	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$S_2$	0	1.23	1.03	0	0	0	0	0	0	0	0
$S_3$	0	0	4.82	6.64	2.81	0	0	0	0	0	0
$S_4$	0	0	0	2.76	0	7.8	0	0	2.08	0	0.52
$S_5$	0	0	0	0	4.68	5.94	0	0	0.66	0	0
$S_6$	0	0	0	0	0	5.45	0	0	23.15	0	9.4
$S_7$	0	0	0	0	0	5.63	9.6	0	0.62	0.15	0
$S_8$	0	0	0	0	0	5.18	0	9.0	0.57	0.25	0
$S_9$	0	0	0	0	0	0	0	0	0.001	0	0
$S_{10}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$\infty$	0
$S_{11}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$\infty$

为了验证有限水体迁移模式的准确性, 以保守成分氯度为指标, 用式(6)和式(7)交替运算. 根据实测资料, 河口 $S_{10}$ 的氯度取11.8, 外海 $S_{11}$ 取17.2, 其余各单元初始值均取12.0. 经50个潮周期运算, 系统已稳定, 结果见表4. 与1982年丰水、平水和枯水期高平潮26个站位准同步调查平均值相比, 吻合较好, 可见模型和水体传输系数是可靠的.

表3 退潮水体传输量 $q_{ij}^r$ ,

(单位:  $10^7\text{m}^3$ )

$S_i$	$S_j$										
	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$	$S_8$	$S_9$	$S_{10}$	$S_{11}$
$S_1$	0.92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$S_2$	0.28	1.23	0	0	0	0	0	0	0	0	0

续表

$S_i$	$S_j$										
	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$	$S_8$	$S_9$	$S_{10}$	$S_{11}$
$S_3$	0	0.62	5.23	0	0	0	0	0	0	0	0
$S_4$	0	0.31	6.35	2.74	0	0	0	0	0	0	0
$S_5$	0	0.1	1.8	0	5.62	0	0	0	0	0	0
$S_6$	0	0	0.92	7.29	4.53	5.79	5.5	5.44	0	0	0
$S_7$	0	0	0	0	0	0	9.12	0	0	0.48	0
$S_8$	0	0	0	0	0	0	0	8.2	0	0.8	0
$S_9$	0	0	0	2.6	1.13	20.61	1.38	1.36	0.001	0	0
$S_{10}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$\infty$	0
$S_{11}$	0	0	0	0	0	11.6	0	0	0	0	$\infty$

表4 厦门港高平潮潮度分布表

元	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$	$S_8$
计算值	15.05	15.29	15.49	15.74	15.63	16.31	15.32	15.07
调查值	—	15.28	15.40	15.79	15.63	16.31	15.33	14.95

## 2.2 水体石油烃的风化模式

海水中石油烃的风化作用包括挥发、微生物降解等生物和化学作用，其风化模式<sup>[4]</sup>可用下式表示：

$$C(t) = C_0 / (KtC_0^{0.1} + 1)^{1.0}, \quad (11)$$

式中 $C_0$ 和 $C(t)$ 分别为 $t=t_0$ 和 $t=t$ 时海水中的石油烃浓度 ( $\text{mg}/\text{dm}^3$ )， $t$ 为风化时间(d)， $K$ 为风化衰减常数 ( $\text{d}^{-1}$ )。  $K$ 与盐度 $S$ 和水温 $T$  (绝对温标) 的关系为：

$$\ln K = 0.0353(27.8 - S) + 5.78 \times 10^{-8}(T - 298) / 298T - 4.20. \quad (12)$$

根据调查结果，取平均水温为 $20^\circ\text{C}$ ，元 $S_1 \sim S_6$ 的平均盐度为28， $S_7$ 和 $S_8$ 的平均盐度为27，由式(12)计算得 $K_1 \sim K_6$ 为 $4.46 \times 10^{-4} (\text{h}^{-1})$ ， $K_7 = K_8 = 4.62 \times 10^{-4} (\text{h}^{-1})$ 。令 $t = \Delta t = 6.2 \text{ h}$ ，将此结果代入式(11)中得到式(10)中 $C'_i$ 的函数关系为 $C'_i(k-1/2) = C_i(k-1) / [6.2K_i C_i(k-1)^{0.1} + 1]^{1.0}$ 以及 $C'_i(k) = C_i(k-1/2) / [6.2K_i C_i(k-1/2)^{0.1} + 1]^{1.0}$ 。

## 2.3 厦门港的油污染源

通过调查，了解了进出厦门港的船只类型、数量、活动情况及港区作业、工业污染等。根据“福建省海岸带环境质量调查研究”(1987年)对船舶、港口调查所定的估算标准统计，排入厦门港的含油污水的油污染源见表5，含油总量为262 t/ar。根据污染源的分布情况及各元的高低潮水容量，计算出在各元涨、退潮时所产生的油含量增量 $f_i$ (表6)。荷载分布向量 $F$ 中 $f_9 \sim f_{11}$ 均为零。

## 2.4 结果

将以上数据代入式(10)中，令 $C_i(0) = C_{11}(t) = 4.0 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ ， $C_{10}(t) = 8.0 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ 。

表5 厦门港的油污染源\*

污染源类型	渔船	小客货轮	小机动船	大客货轮	港口作业	工业污水
数量(艘)	220	450	700	19 549艘次	吞吐量	—
平均停留时间(d)	100	220	220	5.6	468万吨	—
污水含油量(t/a)	66	60	28	46	20	42

\* 1989年的统计数据.

表6 污染源分布及油含量增量

	$S_1$		$S_2$		$S_3$		$S_4$		$S_5$		$S_6$		$S_7$		$S_8$	
	$f_1^f$	$f_1^c$	$f_2^f$	$f_2^c$	$f_3^f$	$f_3^c$	$f_4^f$	$f_4^c$	$f_5^f$	$f_5^c$	$f_6^f$	$f_6^c$	$f_7^f$	$f_7^c$	$f_8^f$	$f_8^c$
1989年																
排油(t/a)	12		23		0		147		3		65		10		2	
$f_i(\mu\text{g}/\text{dm}^3)$	1.08	0.59	1.17	0.60	0	0	1.08	0.80	0.03	0.02	0.15	0.13	0.07	0.04	0.02	0.01
2000年																
排油(t/a)	22		40		40		190		10		80		470		13	
$f_i(\mu\text{g}/\text{dm}^3)$	1.85	1.18	1.87	1.25	0.43	0.20	1.13	1.02	0.09	0.06	0.19	0.15	3.46	2.08	0.10	0.06

表7 厦门港海水中石油烃含量的分布状况 (单位:  $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ )

元	$S_1$			$S_2$			$S_3$			$S_4$		
	低	高	平均	低	高	平均	低	高	平均	低	高	平均
潮时												
调查值	22.8	26.6	24.7	18.4	17.2	17.8	11.4	11.2	11.3	9.0	11.4	10.2
计算值	24.9	24.4	24.6	18.5	16.5	17.5	12.8	12.4	12.6	11.9	9.6	10.8
2000年	49.5	48.5	49.0	38.1	34.4	36.2	27.6	26.5	27.0	25.6	21.1	23.4
元	$S_5$			$S_6$			$S_7$			$S_8$		
	低	高	平均	低	高	平均	低	高	平均	低	高	平均
潮时												
调查值	8.6	9.3	9.0	9.0	8.0	8.5	—	—	—	—	—	—
计算值	10.4	9.7	10.0	9.2	7.1	8.2	9.1	9.2	9.2	8.8	9.0	8.9
2000年	23.2	21.9	22.6	21.4	13.9	17.6	28.3	27.3	27.8	18.5	19.3	18.9

经过式(10)中各式的交替运算,经70个潮周期后,系统已稳定,结果见表7.与1989年4~10月的现场调查数据(共11个站位,每月高、低平潮各监测一次)相比,结果基本吻合.模型引入风化模式后,降低了稳态平衡浓度(降低8%~20%),使计算值能较准确地体现实际情况.

建立模式的目的在于预测.为了了解厦门市的经济发展对厦门港海水中油含量的影响,我们用此模型进行了预测.假设到2000年时,渔船和小机动船排污量不变,小客货轮提高0.5倍,工业、港口和大客货轮各提高1倍.另假设在海沧建一座大型石油化工企业及其运输码头,油的年排放量465 t,总排放量共865 t/a(表6).设 $C_{10}(t)=10\mu\text{g}/\text{dm}^3$ , $C_{11}(t)$ 不变.经70个潮周期运算后,系统达稳态,结果见表7.

由结果可见,对迁移条件较差的 $S_1$ 和 $S_2$ ,纳污量提高0.77倍,油含量却提高1倍;而

$S_7$ 的纳污量提高46倍,含量仅提高2倍.尽管整个港区的纳污量提高3.3倍,但由于主要集中在迁移条件较强的 $S_7$ ,油含量仅提高1~2倍.因此,只要不将污染源放在内湾,厦门港在一段时间内还具有相当的环境容量.

### 3 结语

通过对厦门港海水中石油烃含量的计算表明,本文所建立的有限水体迁移和生、化转化混合模式是可行的.与数值计算法相比,此模式简单且稳定可靠,参数易于确定.只要根据海域的潮差、潮流、混合扩散及地理环境等特点合理划分水体并计算水体交换量 $q_{ij}$ ,且具备污染物的生物、化学转化模式,则该混合模式就可应用于计算受潮汐控制的河口及半封闭海湾中污染物的浓度分布,并由此可估算各单元的纳污能力、计算各单元的环境容量,对海洋管理和海洋环境功能区划有极好的应用前景.

### 参考文献

- 1 Rich L G. 环境系统工程. 北京: 水利出版社, 1984, 1~420
- 2 曾继业等. 纳污海湾难降解污染物质的有限水体混合迁移模式——厦门港污染物质的单纯混合模型. 环境科学学报, 1985, 5(4): 395~404
- 3 吴俊等. 大连湾海水交换及自净能力的研究. 海洋科学, 1983, (6): 32~35
- 4 张珞平等. 河口海湾海水中石油烃的自然风化模式. 海洋学报, 1988, 10(1): 117~121