

· 争鸣与探索 ·

## 多介质模型在海湾突发性有机污染中的应用及案例分析

莫俊超 张海生 薛斌 刘小涯 张海娜

(国家海洋局第二海洋研究所 国家海洋局海洋生态系统与生物地球化学重点实验室 浙江杭州 310012)

**摘要:**为弥补海洋环境监测能力不足,利用受潮汐动力控制海湾中的多介质模型,预测突发性污染发生后海洋环境中污染物的浓度变化信息,并对突发性污染物的迁移转化进行了计算。模型中使用逸度方法和质量平衡算法,预测非挥发性有机物在水、沉积物和鱼中的浓度。在象山港的应用结果表明,该模型可较快速地给出污染物在不同介质中的浓度变化信息,为环境监测和管理提供帮助。

**关键词:**多介质模型 突发性污染事故 有机污染物 海湾

中图分类号:X507 摇 摇 摇 文献标识码:B 摇 摇 摇 文章编号:1006-2009(2011)04-0058-06

### Application of Multimedia Model for Sudden Organic Pollution in Bays and Case Analysis

MO Jun-chao, ZHANG Hai-sheng, XUE Bin, LIU Xiao-ya, ZHANG Hai-na

(Second Institute of Oceanography, SOA, Laboratory of Marine Ecosystem and Biogeochemistry, SOA, Hangzhou, Zhejiang 310012, China)

**Abstract:** In order to supply deficiency of marine environment monitoring at sudden pollution accident, multimedia model for bays controlled by tidal dynamics was used to predict pollutant concentration in sea water, and calculate pollutant quantity of transformation and migration. The model by using fugacity and mass balance method estimated the concentration of no-volatile organic compound in phases of water, sediment and fish. Application result in Xiangshan Harbour indicated that model could quickly give information of pollutant concentration changes in different medium, and help environmental monitoring and management.

**Key words:** Multimedia model; Sudden pollution accident; Organic pollutant; Bays

海洋突发性海洋污染具有发生突然、污染物扩散快和环境危害大等特点<sup>[1]</sup>,对经济生活、人体健康和生态系统均有负面影响<sup>[2]</sup>。近年来,随着我国社会生产力和科学技术的迅速发展,突发性海洋污染事故发生频率增加,目前海洋环境监测技术不完善,污染物的扩散规律与危害很难在极短的时间内明确<sup>[3]</sup>。因此,环境多介质模型成为突发性污染发生后预测污染物扩散规律的一个重要方法<sup>[4]</sup>。

现选择非挥发性有机物进行讨论,将环境多介质模型应用于受潮汐动力控制的海湾中,使用逸度方法和质量平衡算法,在突发性污染条件下得出各介质中逸度和时间的微分方程,利用 MATLAB 软件计算得出污染后的浓度变化数据,从而为环境监测和管理提供参考数据。

#### 1 环境多介质模型

环境多介质模型自 1979 年由加拿大 Toronto 大学的 Mackay 教授提出以来<sup>[5]</sup>,经过 30 多年的不断发展和完善,现已得到广泛的应用。该模型将自然环境看作各介质的组合体,通过质量平衡算法预测污染物在不同介质间的浓度,可弥补环境监测工作的不足<sup>[6]</sup>,已应用的地区和目标污染物见表 1。

收稿日期 2010-11-30; 修订日期 2011-04-10

基金项目:海洋公益性行业科研专项基金资助项目(201005034);国家海洋局第二海洋研究所基本科研业务费专项基金资助项目(JT1009);国家海洋局第二海洋研究所海洋生态系统与生物地球化学重点实验室开放基金资助项目(LMEB200901)

作者简介:莫俊超(1986—),男,陕西咸阳人,硕士研究生,主要从事海洋环境化学研究工作。

表 1 摇环境多介质模型在不同地区的应用

Table 1 摇 Application of environmental multimedia model in different area

应用地区	污染物	参考文献
波罗的海	$\alpha$ -HCH, $\gamma$ -HCH	[6]
欧洲和美国	BPA	[7]
意大利 Venice 湖	OCDD, OCDF, PCB-180	[8]
黄河下游	HCHs	[9]
加拿大 Harp 湖和 Dickie 湖	Hg	[10]
瑞士 Thun 湖	PBDEs, PCBs	[11]
台湾 3 个地区的土壤和地下水	PCE, TCE, DCE 等	[12]
海口及其南部的排水渠	PCP	[13]

表 2 摇 Z 值的定义

Table 2 摇 Definition of Z parameters

相	Z 值的定义	各参数所表示的物理量 (单位)
水相	$Z_w = 1/H$ 或 $c^S/p^S$	H 为亨利常数 ( $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ ), $c^S$ 为水中溶解度 ( $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$ ), $p^S$ 为蒸气压 (Pa)
鱼相	$Z_B = K_B \rho_B / H = K_B \rho_B Z_w$	$K_B$ 为生物浓缩因子 ( $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ), $\rho_B$ 为鱼的密度 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
沉积物相	$Z_S = K_S \rho_S / H = K_S \rho_S Z_w$	$K_S$ 为沉积物-水分配系数 ( $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ), $\rho_S$ 为沉积物密度 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

1.2 摇质量平衡方程

总体上, 对于一段特定区域, 有

$$dM/dt = \text{总输入速率} - \text{总输出速率}$$

其中  $M$  为污染物在介质中的物质的量, mol;  $t$  为时间, h。以下计算都基于这个最基本的质量平衡方程。

将此方程用逸度和逸度容量来描述。对于  $M$ , 有  $M = VZf$ , 其中  $V$  为介质的体积,  $\text{m}^3$ 。代入上式, 可得:

$$ZV \frac{df}{dt} + Zf \frac{dV}{dt} = \text{总输入速率} - \text{总输出速率}$$

1.3 摇各介质中的质量平衡方程

海湾中的介质可划分为大气、水、鱼和沉积物等。对于非挥发性有机物而言, 大气相可忽略。这里只考虑水相、鱼相和沉积物相。 $D$  表示迁移参数, 下标 R 表示转化,  $D_R$  表示转化  $D$  值。污染物在各相间的迁移转化关系见图 1。

各相中质量平衡方程如下:

对于分段  $i$ , 鱼相的质量平衡方程为

$$Z_B V_{iB} \frac{df_{iB}}{dt} = E_{iB} + f_{iW} D_{iWB} - f_{iB} (D_{iBW} + D_{iBR}) \quad (1)$$

对于分段  $i$ , 沉积物相的质量平衡方程为

$$Z_S V_{iS} \frac{df_{iS}}{dt} = E_{iS} + f_{iW} D_{iWS} - f_{iS} (D_{iSW} + D_{iSR}) \quad (2)$$

1.1 摇逸度和逸度容量

使用多单元四级逸度模型计算海湾中突发性污染物在各介质中的浓度。逸度是 Lewis 在 1901 年引入的一种新的平衡标准, 单位与压力一样为帕斯卡, 符号定义为  $f$ 。环境化学的计算中, 使用逸度概念比浓度更为方便 [4]。

环境中有机污染物的浓度通常很低, 因此其浓度和逸度成比例, 比例系数定义为逸度容量, 符号定义为  $Z$ 。即  $Z = c/f$ , 其中  $c$  为浓度,  $f$  为逸度。文章中所涉及到的各相中  $Z$  值的定义, 下文中分别用下标 W、S 和 B 代表水相、沉积物相和鱼相, 见表 2。

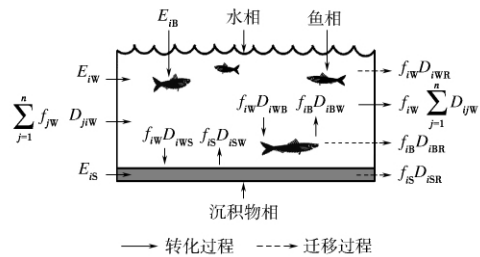


图 1 摇一个分段内污染物的迁移和转化

Fig. 1 摇 Transport and transformation of pollutants in a single section

对于水相来说, 体积不再固定不变, 是时间  $t$  的函数, 应由潮汐变化来计算水相体积的变化。设分段  $i$  水相体积函数为  $V_{iW}(t)$ , 则有

$$Z_w V_{iW}(t) \frac{df_{iW}}{dt} + Z_w f_{iW} \frac{dV_{iW}(t)}{dt} = E_{iW} + \sum_{j=1}^n f_{jW} D_{jiW} + f_{iB} D_{iBW} + f_{iS} D_{iSW} - f_{iW} (\sum_{j=1}^n D_{ijW} + D_{iWB} + D_{iWS} + D_{iWR}) \quad (3)$$

方程中各参数的定义见表 3。迁移参数  $D$  值的计算方法见表 4。介质内和介质间的迁移转化速率见表 5。

表 3 摇参数的定义  
Table 3 摇 Definition of parameters

参数	参数的定义	单位
$f_{iB} \setminus f_{iS} \setminus f_{iW}$	分段 $i$ 中 污染物在介质内的逸度	Pa
$E_{iB} \setminus E_{iS} \setminus E_{iW}$	分段 $i$ 中 介质内的污染物输入量	$\text{mol} \cdot \text{h}^{-1}$
$V_{iB} \setminus V_{iS} \setminus V_{iW} (t)$	分段 $i$ 中 介质的体积函数	$\text{m}^3$
$D_{iSW} \setminus D_{iWS} \setminus D_{iWB} \setminus D_{iBW}$	分段 $i$ 中 介质间的迁移 $D$ 值 第二个下标表示迁出相 第三个下标表示迁入相	$\text{mol} \cdot (\text{h} \cdot \text{Pa})^{-1}$
$D_{iBR} \setminus D_{iSR} \setminus D_{iWR}$	分段 $i$ 中 介质内的转化 $D$ 值	$\text{mol} \cdot (\text{h} \cdot \text{Pa})^{-1}$
$D_{jW}$	水相中 分段 $i$ 到分段 $j$ 的平流 $D$ 值	$\text{mol} \cdot (\text{h} \cdot \text{Pa})^{-1}$

表 4 摇  $D$  值的计算方法  
Table 4 摇 Calculation methods of  $D$  parameters

$D$ 值参数	计算方法	各参数所表示的物理量 (单位)
$D_{iSW}$	$D_{iSW} = 1 / [1 / (k_{SW} A_i Z_W) + Y_S / (B_{MW} A_i Z_W)]$	$k_{SW}$ 为沉积物上水侧传质系数 ( $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$ ) $A_i$ 为分段 $i$ 的平均低潮水面面积 ( $\text{m}^2$ ) $Y_S$ 为沉积物中扩散路径长度 ( $\text{m}$ ) $B_{MW}$ 为水中分子扩散系数 ( $\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ )
$D_{iWS}$	$D_{iWS} = D_{iSW}$	
$D_{iWB}$	$D_{iWB} = k_{WB} V_{iB} Z_B$	$k_{WB}$ 为水相向鱼相扩散的速率常数 ( $\text{h}^{-1}$ ) $V_{iB}$ 为分段 $i$ 中鱼相的体积 ( $\text{m}^3$ )
$D_{iBW}$	$D_{iBW} = D_{iWB}$	
$D_{iBR}$	$D_{iBR} = k_{BR} V_{iB} Z_B$	$k_{BR}$ 为鱼相中污染物转化的速率常数 ( $\text{h}^{-1}$ )
$D_{iSR}$	$D_{iSR} = k_{SR} V_{iS} Z_S$	$k_{SR}$ 为沉积物相中污染物转化的速率常数 ( $\text{h}^{-1}$ ) $V_{iS}$ 为分段 $i$ 中沉积物相的体积 ( $\text{m}^3$ )
$D_{iWR}$	$D_{iWR} = k_{WR} V_{iW} (t) Z_W$	$k_{WR}$ 为水相中污染物转化的速率常数 ( $\text{h}^{-1}$ ) $V_{iW} (t)$ 为分段 $i$ 中水相的体积函数 ( $\text{m}^3$ )
$D_{jW}$	根据潮流和蓄水量变化计算	
$D_{jW}$	$D_{jW} = -D_{jW}$	

表 5 摇迁移和转化速率的计算  
Table 5 摇 Calculation of transport and transformation rates

迁移和转化过程	机理	速率 / ( $\text{mol} \cdot \text{h}^{-1}$ )
水 → 沉积物	扩散、沉降	$f_{iW} D_{iWS}$
沉积物 → 水	扩散、再悬浮	$f_{iS} D_{iSW}$
水 → 鱼	扩散、吸收	$f_{iW} D_{iWB}$
鱼 → 水	扩散、排泄	$f_{iB} D_{iBW}$
分段 $i$ 水体 → 分段 $j$ 水体	平流	$f_{iW} D_{jW}$
转化	改变 CAS 编号的反应	$f_{iB} D_{iBR} \setminus f_{iS} D_{iSR} \setminus f_{iW} D_{iWR}$

1.4 摇水相体积的计算

$t$  时刻分段  $i$  中水相的体积可根据低潮蓄水量和高潮蓄水量估算。这里假设水相的体积与时间

呈简单的三角函数的关系,高潮位和低潮位不变,采用简单三角函数进行拟合。令  $t = 0$  对应某一低潮时刻,则在第  $k$  个潮周期中:

$$V_{iW} (t) = V_{iWL} + \frac{1}{2} (V_{iWH} - V_{iWL}) \left[ 1 + \sin \left( \frac{2\pi t'}{T} - \frac{\pi}{2} \right) \right], \quad t' \in [0, T] \quad (4)$$

其中  $V_{iW} (t)$  为  $t$  时刻分段  $i$  中水相的体积,  $V_{iWL}$  为分段  $i$  的低潮蓄水量,  $V_{iWH}$  为分段  $i$  的高潮蓄水量。  $t' = t - (k - 1)T$ ,  $T$  为潮周期。用简单的三角函数拟合,只有一个公式,便于编写程序。虽然这种拟合不符合实际情况,但可以简便地模拟蓄水量的变化。

在实际的海湾中,蓄水量往往呈现出复杂的周期性变化。不同海湾需要使用不同的蓄水量函数

进行拟合。对于一个具体的海湾,可从文献中查到相应的潮位—时间关系式,进而得出蓄水量—时间关系式。但对于环境多介质模型的计算,关系式过于复杂,难用常见的个人计算机计算。以下具体应用时选择方程(4)的蓄水量计算方法计算。

2 摇案例分析——以象山港为例

2.1 摇区域划分及参数选取

象山港地处浙江东部沿海,呈狭长半封闭型,平均水深 10 m,潮汐类型为不规则半日潮<sup>[15]</sup>。整个港域内不仅涨落潮历时不等,而且还存在高潮不等、低潮不等和日不等现象<sup>[16]</sup>。由于潮位变化复杂,很难用简单的函数关系来描述蓄水量与时间的关系。但根据多年长周期情况,各区域蓄水量和水体交换量基本平衡<sup>[17]</sup>。这里选择 1.4 的方法进行蓄水量计算。

根据象山港实际地形和潮流等特点,根据文献[17]区域划分方法,将其划分为 8 个区域,见图 2。

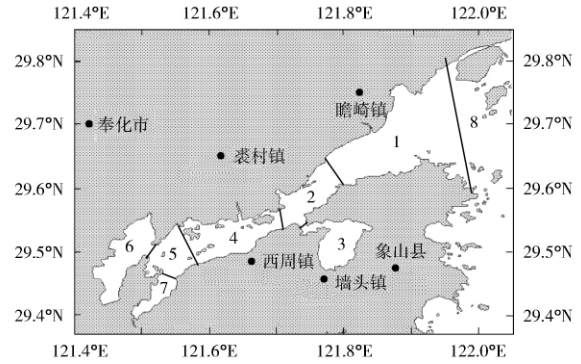


图 2 摇象山港的区域划分

Fig. 2 摇Area partition for Xiangshan Harbour

其中 8 代表港外水体,具有无限稀释的能力。计算沉积物相的体积时,沉积物深度取 5 cm,面积取平均低潮水面面积。鱼相体积由水产品产量<sup>[17]</sup>和文献[6]给出的典型值估算,即鱼相体积 = 养殖产量/鱼的密度 + 0.5 × (平均高潮蓄水量 + 平均低潮蓄水量) × 10<sup>-6</sup>,计算时仅统计浅海养殖鱼类,所得数据见表 6。

表 6 摇象山港区域划分参数

Table 6 摇Parameters of area partition of Xiangshan Harbour

区域	1	2	3	4	5	6	7
Q (平均高潮蓄水)/10 <sup>7</sup> m <sup>3</sup>	223.0	76.2	29.4	63.3	23.2	28.2	7.8
Q (平均低潮蓄水)/10 <sup>7</sup> m <sup>3</sup>	164.0	62.7	9.3	53.4	19.5	9.0	1.1
h (平均低潮)/m	30.0	25.0	2.0	12.0	10.0	7.0	4.0
A (平均低潮水面)/10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup>	54.67	25.08	46.50	44.50	19.50	12.89	2.73
V (沉积物相)/10 <sup>5</sup> m <sup>3</sup>	27.30	12.50	23.30	22.30	9.75	6.44	1.36
V (鱼相)/m <sup>3</sup>	2 138	740	3 671	738	1 107	5 842	45

摇摇象山港的潮周期  $T = 12.3 \text{ h}$ <sup>[17]</sup>,涨落潮历时不等,忽略时差,认为涨落潮均经历半个潮周期。

2.2 摇污染物的选择

4-壬基酚属于环境内分泌干扰物,结构与生物体内天然雌激素 17β-雌二醇相似,可干扰生物

体内正常的荷尔蒙系统<sup>[8]</sup>,因此正成为新的研究热点。其蒸气压较低,属于非挥发性有机物。鉴于以上特点,这里选择其作为突发性有机污染物。密度参数和有机质含量取文献[6]中给出的典型值。4-壬基酚在介质中的逸度容量见表 7。

表 7 摇逸度容量的计算

Table 7 摇Calculation of fugacity capacities

介质	Z (逸度容量)/(mol · Pa <sup>-1</sup> · m <sup>-3</sup> )	计算过程
水	$Z_W = 1/H = 1.074$	$H = p^S/c^S = 0.9308 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$
沉积物	$Z_S = K_S \rho_S Z_W = 798.12$	$\rho_S = 1.5 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-3}$ $L_S = 0.04$ $K_S = 0.41 L_S K_{OW} = 495.27 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
生物	$Z_B = K_B \rho_B Z_W = 1 557.30$	$\rho_B = 1.0 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-3}$ $L_B = 0.048$ $K_B = L_B K_{OW} = 1 449.58 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

其中  $p^s$  为蒸气压,  $c^s$  为水中溶解度,  $H$  为亨利常数,  $\rho$  为密度,  $L_s$  为沉积物中有机碳的含量,  $L_B$  为鱼中类脂的含量,  $K_{OW}$  为辛醇-水分配系数。

$p^s$  和  $c^s$  引自文献 [18],  $\rho_s, \rho_B, L_s$  和  $L_B$  引自文

献 [6]。

### 2.3 扩散和转化的 D 值的计算

根据表 5 中的方法, 计算出  $D$  值。扩散和转化  $D$  值的计算结果, 见表 8。

表 8 扩散和转化的  $D$  值  
Table 8  $D$  parameters of diffusion and reaction

条件	区域	1	2	3	4	5	6	7
扩散: $k_{SW} = 0.01 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$	沉积物-水 $D_{SW}/10^3$	43.5	2.0	37.0	35.4	15.5	10.3	21.7
扩散: $Y_S = 0.005 \text{ m}$	鱼-水 $D_{BW}/10^3$	80.3	27.8	138.0	27.7	41.6	219.1	1.67
扩散: $B_{MW} = 4.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$								
转化: $k_{WB} = 0.024 \text{ h}^{-1}$								
转化: $k_{WR} = 3.90 \times 10^{-2} \text{ h}^{-1}$	水 $D_{WR}$				$D_{iWR} = k_{WR} V_{iW} (t) Z_W$			
转化: $k_{SR} = 4.38 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$	沉积物 $D_{SR}/10^4$	95.5	43.8	81.2	77.7	34.1	22.5	4.76
转化: $k_{BR} = 7.22 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$	鱼 $D_{BR}/10^3$	24.0	8.3	41.3	8.3	12.4	65.7	0.5

其中  $k_{SW}, Y_S, B_{MW}$  引自文献 [6],  $k_{WB}$  引自文献 [19],  $k_{WR}, k_{SR}$  引自文献 [20],  $k_{BR}$  引自文献 [21]。

### 2.4 模型输出结果

假定区域 5 在低潮时发生突发性污染, 有 10 t 的 4-壬基酚泄入水体中。根据 1.3 的各介质中的质量平衡方程和 1.4 的水相体积计算方法, 计算

各分段各介质的逸度变化, 进而得出其浓度变化。总共得到 21 个微分方程。方程组中不同解的变化差别较大, 判断其为刚性微分方程组, 用 MATLAB 6.5 软件中的 ode15s 函数解出其数值解 [22]。不同介质和不同区域浓度变化差异很大, 见图 3 (a) (b) (c) (d) (e) (f)。

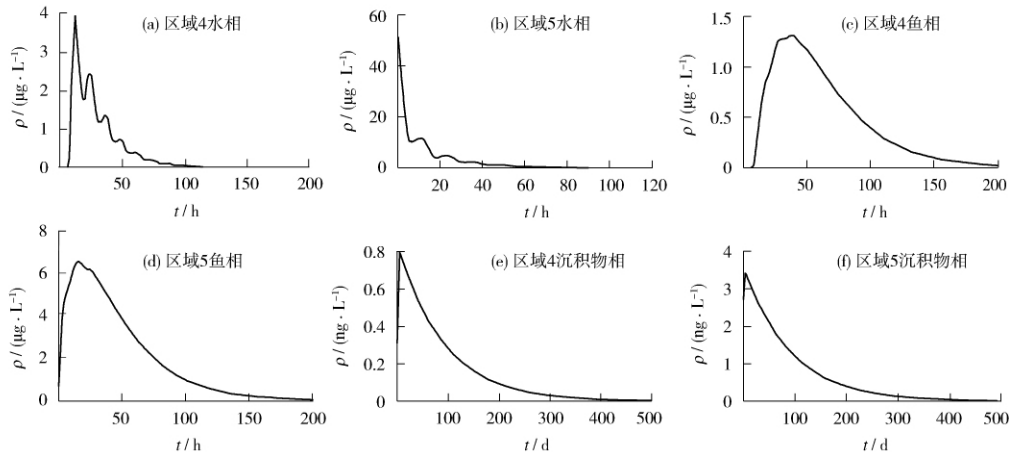


图 3 模型输出结果

Fig. 3 Outputs of the model

水体中 4-壬基酚的半效应质量浓度 ( $EC_{50}$ ) 为  $5.7 \mu\text{g}/\text{L}$ , 安全质量浓度 ( $SC$ ) 为  $1.7 \mu\text{g}/\text{L}$  [18], 沉积物的  $EC_{50}$  和  $SC$  目前还没有统一规定。计算结果显示在假定的污染事件 23 h 后, 水体中 4-壬基酚的最高浓度才能降到  $EC_{50}$  以下, 而降至  $SC$  以

下则需 42 h。鱼相内 4-壬基酚浓度的变化曲线与水体类似, 沉积物中的 4-壬基酚降解时间则较长。

### 2.5 模型需改进之处

(1) 由于 4-壬基酚被广泛使用, 环境中的背

景浓度可能较高,在此基础上计算更接近实际。

(2)由于模型中参数较多,文献中并不能搜集到所有参数的数据。因此使用的 $\rho_s$ 、 $\rho_B$ 、 $k_{sw}$ 、 $Y_s$ 等数据均为典型值,这也是研究人员应用多介质模型时,在数据缺失或不易测定的情况下常用的方法<sup>[8,19,23-24]</sup>。很明显,使用实测值可以提高预测精度。

(3)在计算过程中,将结束时间设为15 000 h时,计算约耗时30 min。探索更好的算法,将会使模型得到更广泛的应用。

(4)若希望得到更符合实际的数据,则应更细致地划分区域。区域增多,会使微分方程的数量增加,计算耗时更长。划分合理的区域,是模型应用的关键问题。

### 3 结语

将多介质模型应用于受潮汐动力控制的海湾中,可预测非挥发性有机物突发性污染后,污染物在各介质中的浓度。模型可迅速给出污染物的浓度变化信息,为环境监测和管理提供参考数据。

### 【参考文献】

- [1] 摇全永波. 论我国海洋环境突发事件的应急管理[J]. 海洋开发与与管理, 2008, 25(1): 120-127.
- [2] 摇侯瑜, 郑鹏凯, 张天柱. 突发性水污染事件损失的系统分析[J]. 环境监测管理与技术, 2008, 20(2): 12-15.
- [3] 摇曲凤风. 浅析我国海洋环境突发事件预警机制[J]. 金卡工程 经济与法, 2010, 14(4): 113.
- [4] 摇肖勇泉, 齐燕红. 突发环境事件应急处置中的监测支持[J]. 环境监测管理与技术, 2005, 17(2): 4-6.
- [5] 摇MACKAY D. Finding fugacity feasible[J]. Environmental Science & Technology, 1979, 13(10): 1218-1223.
- [6] 摇BREIVIK K, WANIA F. Evaluating a model of the historical behavior of two hexachlorocyclohexanes in the Baltic Sea environment[J]. Environmental Science & Technology, 2002, 36(5): 1014-1023.
- [7] 摇COUSINS I T, STAPLES C A, KLECKA G M, et al. A multimedia assessment of the environmental fate of bisphenol A[J]. Human and Ecological Risk Assessment, 2002, 8(5): 1107-1135.
- [8] 摇SOMMERFREUND J K, GANDHI N, DIAMOND M L, et al. Contaminant fate and transport in the Venice Lagoon: Results from a multisegment multimedia model[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2010, 73(3): 222-230.
- [9] 摇AO J T, CHEN J W, TIAN F L, et al. Application of a level IV fugacity model to simulate the long-term fate of hexachlorocyclohexane isomers in the lower reach of Yellow River basin, China[J]. Chemosphere, 2009, 74(3): 370-376.
- [10] 摇ETHIER A L, LEAN E R, SCHEUHAMMER A M, et al. Predicting mercury concentrations and fluxes in the water column and sediment of lakes with a limited dataset[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2010, 29(7): 1457-1465.
- [11] 摇BOGDAL C, SCHERINGER M, SCHMID P, et al. Levels, fluxes and time trends of persistent organic pollutants in Lake Thun, Switzerland: Combining trace analysis and multimedia modeling[J]. Science of the Total Environment, 2010, 408(17): 3654-3663.
- [12] 摇FAN C, CHEN Y C, MA H W, et al. Comparative study of multimedia models applied to the risk assessment of soil and groundwater contamination sites in Taiwan[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 182(1): 778-786.
- [13] 摇CHI J, HUANG G L. A multimedia fugacity river model of pentachlorophenol in south drainage canal, China[J]. Journal of environmental science and health part A: Toxic/hazardous substances & environmental engineering, 2002, 37(1): 113-125.
- [14] 摇唐纳德 麦凯. 环境多介质模型: 逸度方法[M]. 黄国兰, 陈春江, 孔庆宁译. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [15] 摇吴晓燕, 管卫兵. 象山港内三维边界潮流的数值模拟[J]. 海洋学研究, 2009, 27(2): 23-31.
- [16] 摇娄海峰, 黄世昌, 谢亚力. 象山港内水体交换数值研究[J]. 浙江水利科技, 2005, 33(4): 8-12.
- [17] 摇黄秀清, 王金辉, 蒋晓山. 象山港海洋环境容量及污染物总量控制研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2008.
- [18] 摇SOARES A, GUIEYSSE B, JEFFERSON B, et al. Nonylphenol in the environment: A critical review on occurrence, fate, toxicity and treatment in wastewaters[J]. Environment International, 2008, 34(7): 1033-1049.
- [19] 摇HUANG G L, HOU S G, WANG L, et al. Distribution and fate of nonylphenol in an aquatic microcosm[J]. Water Research, 2007, 41(20): 4630-4638.
- [20] 摇HEINIS L J, KNUTH M L, LIBER K, et al. Persistence and distribution of 4-nonylphenol following repeated application to littoral enclosures[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1999, 18(3): 363-375.
- [21] 摇ISHIBASHI H, HIRANO M, MATSUMURA N, et al. Reproductive effects and bioconcentration of 4-nonylphenol in medaka fish[J]. Chemosphere, 2006, 65(6): 1019-1026.
- [22] 摇薛定宇, 陈阳泉. 高等应用数学问题的 MATLAB 求解[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [23] 摇WEGMANN F, SCHERINGER M, MOLLER M. Influence of vegetation on the environmental partitioning of DDT in two global multimedia models[J]. Environmental Science & Technology, 2004, 38(5): 1505-1512.
- [24] 摇PRIEMER D A, DIAMOND M L. Application of the multimedia urban model to compare the fate of SOCs in an urban and forested watershed[J]. Environmental Science & Technology, 2002, 36(5): 1004-1013.