

海洋生态系统中放射性核素转移的数值模拟

苏 柯

(暨南大学, 广东 广州 510632)

摘要:在西大亚湾海域浓度场分布的基础上,用库室模型分析的观点建立了海洋生态系统库室模型,采用浓集因子法建立了相应的线性方程组,对放射性核素在浮游植物、浮游动物、软体动物、甲壳动物、鱼类以及沉积物中的迁移进行数值模拟。数值模拟结果从一定程度上反映了核电站液态排放对海洋生态系统影响的规律。这为预测核电站废水排放对海洋生态系统的影响提供了一套有价值的参考模型及软件。

关键词:库室模型;放射性核素;生态系统;转移

中图分类号:X591 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-3096(2007)10-0051-04

广东大亚湾核电站(GNPS)和岭澳核电站(LNPS)都是位于大亚湾西海岸的滨海核电站。GNPS和LNPS的循环冷却水均取自大亚湾海水,两座核电站采用两取合排方案,两者的合排流量为 $190 \text{ m}^3/\text{s}$ 。在核电站生产过程中,不可避免地排放出一定数量放射性物质,对其所处的海洋生态系统产生一定影响。为研究海洋生态系统中放射性核素的转移规律以及估测核电站废水排放对海水环境的影响,作者采用了库室模型分析的方法建立了海洋生态系统库室模型。

1 数值模拟之前的准备

在进行海洋生态系统的数值模拟之前,首先必须计算出放射性核素在海水中的浓度场分布,这是海洋生态系统数值模拟的一个前提条件。采用显、隐方向交替法求解二维潮流污染扩散方程组,计算出放射性核素在海水中的浓度分布。二维潮流污染扩散方程组如下所示^[1]:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV + g \frac{\partial \xi}{\partial x} + g \frac{U \sqrt{U^2 + V^2}}{HC_f} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU + g \frac{\partial \xi}{\partial y} + g \frac{V \sqrt{U^2 + V^2}}{HC_f} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (HU) = \frac{\partial}{\partial y} (HV) = \begin{cases} S_w (\text{排水口的排水量}) \\ - S_w (\text{吸水口的吸水量}) \\ 0 (\text{其他所有网格点}) \end{cases} \quad (3)$$

$$\frac{\partial (HC)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (HCU) + \frac{\partial}{\partial y} (HCV) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(HD_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(HD_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + S_v H \quad (4)$$

式中, U, V 为 $-h \leq z \leq \xi$ 之间 x, y 方向的平均流速; C 为 $-h \leq z \leq \xi$ 的平均浓度; h 为静水深, 即从平均海平面(即未扰动海平面)算起的海水深度; ξ 为水位即海平面相对于未扰动海面的高度; $H = h + \xi$; g 为重力加速度; f 为科氏系数; C_f 为粗度系数, 又称谢才(chézy)系数 ($C_f = H^{1/3}/n$, n 为曼宁系数, $n = 0.05$); D_x, D_y 分别为 x, y 方向的扩散系数; S_v 为排放口的放射源强度。有关潮流场详细的模拟研究见文献[1]。

2 海洋生态系统中放射性核素转移的数值模拟

在海水中放射性核素的浓度场分布的基础上,进一步进行海洋生态系统中放射性核素转移的数值模拟,采用库室模型分析法,分析大亚湾和岭澳核电站液态排出物在海水、浮游植物、浮游动物、软体动物、甲壳动物、鱼类以及海洋沉积物之间的迁移转化规律。

2.1 数学模型

根据库室模型或隔舱模型的观点来模拟海洋生态系统。国外在库室模型的开发方面有一些经验^[2],

收稿日期:2004-09-20;修回日期:2005-10-28

作者简介:苏柯(1977-),男,山西省太原人,硕士研究生,主要从事计算物理研究,电话:13434251401, E-mail:oxpgs@jnu.edu.cn

但是对整个海洋生态系统的数值模拟还较少。作者建立的海洋生态系统库室模型选取了海洋生态系统中的典型物种进行模拟,基本上全面地模拟了整个海洋生态系统内的转移过程。海洋生态系统中库室模型理论表明:与外部空间交换物质的库室称“开库室”;与外部空间不交换物质的库室称“闭库室”;只接受外部物质而不释放出物质的库室称“积累库室”,又称“汇库室”。这样,放射性核素从给定的污染物向各种生物或物质迁移的模型可看作一个具有一定边界空间的库室,且该库室内物质可以自由运动和均匀混合。同时把生态系统设想为由若干个具有不同单元和互相联系的库室组成,每个库室表示系统的分量,以便对整个系统进行分析。而且,在本模型中,根据实际情况,既有开库室,也有积累库室。下面给出放射性核素从海水到海洋生物及沉积物转移的库室模型框图(图1)。

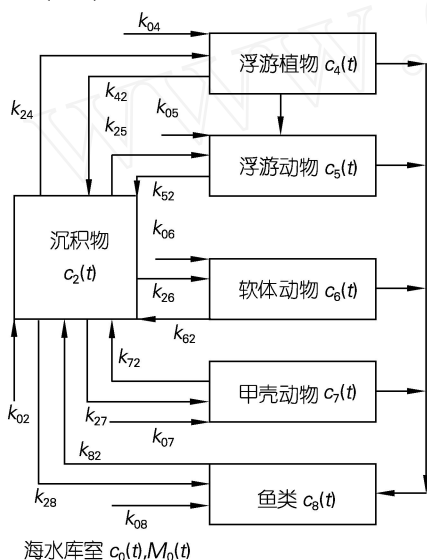


图1 放射性核素从海水到海洋生物及沉积物转移的库室模型框图

Fig.1 The compartment model figure of the radionuclide transfer from the ocean to the biologies and sediments in the ocean

k_{0i} 表示放射性核素从海水转移到库室 i ;
 $C_i(t)$ ——第 i 库室在时间 t 的放射性浓度 (Bq/kg);
 $M_i(t)$ ——第 i 库室中放射性物质质量 (kg);
 $C_w(t)$ ——海水环境中参与转移的放射性浓度 (Bq/L);
 k_{ij} ——从库室 i 到库室 j 的浓集因子 ($i \neq j$)。

2.2 海洋生态系统中放射性核素转移的方程组

描述放射性核素从海水到海洋生物及沉积物的转移可以采用系统分析法或浓集因子法。系统分析法又称转移系数法,它是描写放射性核素在环境中的动力学行为的,一般的数学模式是与时间、空间有关的微分方程组,描写放射性核素在库室中瞬时经过这些库室的行为。当 K_{ij} 随时间变化(即表示转移系数)时,对所建立的库室模型,采用系统分析法(即转移系数法)来解决库室模型,这样可以得到描述海洋生态系统动力学行为的微分方程组。而浓集因子法主要应用于评价放射性核素有计划排放引起的后果,它适用于排放率与水中放射性物质浓度处于动态平衡状态。各库室浓度与时间无关,相邻库室浓度之比为一常数。此法简单,只涉及代数运算。此法的缺点是不能描述放射性核素在水环境中随时间的变化,即它不能描写短寿命核素在短期排放或中止后,这些核素在环境中积累和消除的过程。由于转移系数法中所用的转移系数难于获得,于是采用了浓集因子法来描述库室模型。

试验表明,当放射性核素经过一定时间(大约12个潮周期)的转移后,在海洋生态系统中达到动态平衡, k_{ij} 不随时间变化(即表示浓集因子),这时,采用浓集因子法来解决库室模型,得到线性方程组:

$$k_{04} C_w + k_{24} C_2 - (k_{42} + k_{45} + k_{48} + \lambda_p) C_4 = 0 \quad (5)$$

$$k_{02} \rho_0^{-1} C_w + k_{42} C_4 + k_{52} C_5 + k_{62} C_6 + k_{72} C_7 + k_{82} C_8 - (k_{24} + k_{25} + k_{26} + k_{27} + k_{28} + \lambda_p) C_2 = 0 \quad (6)$$

$$k_{05} C_w + k_{25} C_2 + k_{45} C_4 - (k_{52} + k_{58} + \lambda_p) C_5 = 0 \quad (7)$$

$$k_{06} C_w + k_{26} C_2 - (k_{62} + k_{68} + \lambda_p) C_6 = 0 \quad (8)$$

$$k_{07} C_w + k_{27} C_2 - (k_{72} + k_{78} + \lambda_p) C_7 = 0 \quad (9)$$

$$k_{08} C_w + k_{28} C_2 + k_{48} C_4 + k_{58} C_5 + k_{68} C_6 + k_{78} C_7 - (k_{82} + \lambda_p) C_8 = 0 \quad (10)$$

式中, λ_p 为放射性核素衰变常数 ($1/a$)。

2.3 放射性核素在物质之间以及在物质与海水间转移的浓集因子的计算

$$k_{24} = k_{04} / k_{02}; k_{42} = k_{02} / k_{04};$$

$$k_{25} = k_{05} / k_{02}; k_{52} = k_{02} / k_{05};$$

$$k_{26} = k_{06} / k_{02}; k_{62} = k_{02} / k_{06};$$

$$k_{27} = k_{07} / k_{02}; k_{72} = k_{02} / k_{07};$$

$$k_{28} = k_{08} / k_{02}; k_{82} = k_{02} / k_{08};$$

$$k_{48} = k_{08} / k_{04}; k_{58} = k_{08} / k_{05};$$

$$k_{68} = k_{08} / k_{06}; k_{78} = k_{08} / k_{07};$$

$$k_{45} = k_{05} / k_{04} \quad (11)$$

海洋生态系统中放射性核素 ^{110m}Ag 从海水到各生物及沉积物的浓集因子见表1。

表 1 海洋生态系统中放射性核素^{110m}Ag 从海水到各生物及沉积物的浓集因子

Tab. 1 The concentration factor of radionuclide ^{110m}Ag from ocean to ecosystems and sediments

浮游植物 k_{ij} (L/ kg)	浮游动物 k_{ij} (L/ kg)	软体动物 k_{ij} (L/ kg)	甲壳动物 k_{ij} (L/ kg)	鱼类 k_{ij} (L/ kg)	沉积物 k_{ij}
1 000	1 000	100 000	5 000	1 000	10 000

2.4 参数选择

放射性生态学表明,关键放射性核素^{110m}Ag 在海洋生态系统中的行为研究应是当前研究的重点之一。而且湾内海洋生物中海藻、墨鱼以及贝类对放射性核素^{110m}Ag 有明显的吸附作用。因此,选取放射性核素^{110m}Ag 作为考察对象,其年排放量为 4.58×10^9 Bq/a,衰变常数 λ_0 为 $1.001(1/a)$ 。

3 结果与讨论

以浮游植物数值模拟结果为例,来分析所建立的海洋生态系统库室模型的正确性。模拟时间选取 1999 年,地点选取大鹏澳及西大亚湾海域(图 2)。对大鹏澳及西大亚湾海域的数值模拟结果见图 3。

图 4 为浮游植物数值模拟结果的曲线图。由图看出,沉积在浮游植物体内的放射性核素^{110m}Ag 浓度大致维持在 0.06 Bq/kg 上下。

沉积物的模拟结果见图 5。

根据试验监测值可知,沉积物放射性含量大约在 1 Bq/kg 左右,而作者的数值模拟结果的平均含量为 1.4551 Bq/kg 。由此可见,对沉积物而言,模拟结果同试验监测结果也是基本吻合的。上述值之所以略有不同,是因为作者的模拟采用的是浓集因子法,反映的是排放率与水中放射性浓度处于平衡状态下的情况,而试验监测值是放射性核素随时间变化的瞬时值。但是通过分析试验监测值发现,它们随时间变化幅度并不大,因此还是可以用作参照对象。

通过上述分析表明,可以采用海洋生态系统库室模型作为分析预测海洋生态系统中放射性核素转移的一种工具。通过此库室模型的建立,为核电站液态排放物在海洋生态系统中迁移转化规律的研究提供了一套有价值的软件和科学研究方法,为核电站水环境质量评估提供了科学依据。

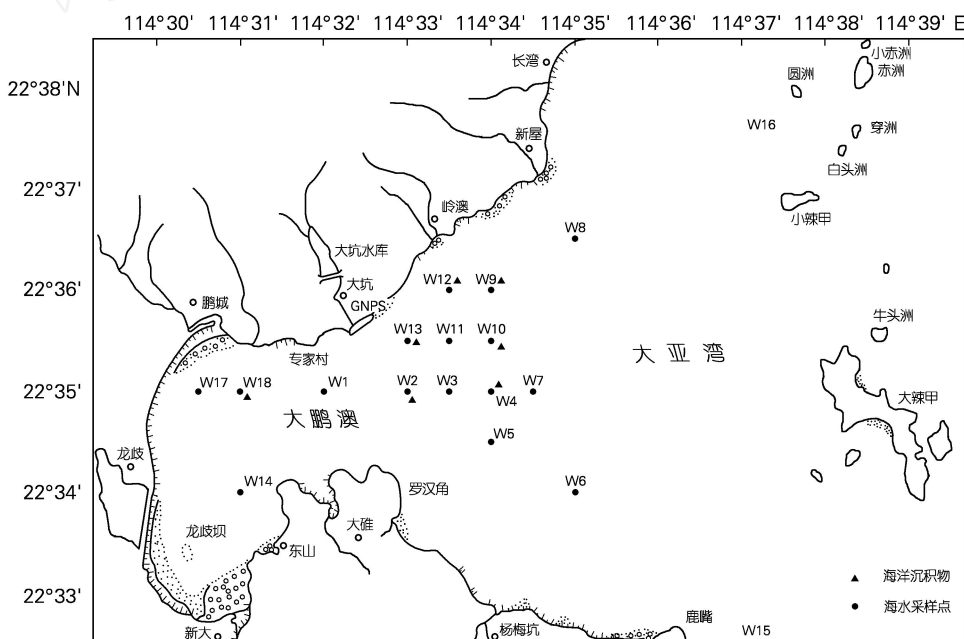


图 2 大鹏澳及西大亚湾内采样点位置

Fig. 2 The location map for the samples in the Dapengao and the Daya Bay

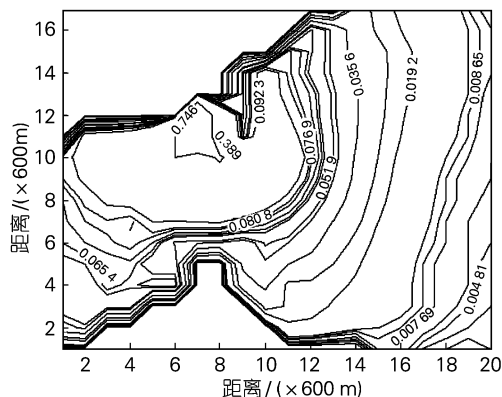


图3 浮游植物的数值模拟结果(Bq/kg)

Fig. 3 The simulation results of the phytoplankton(Bq/kg)

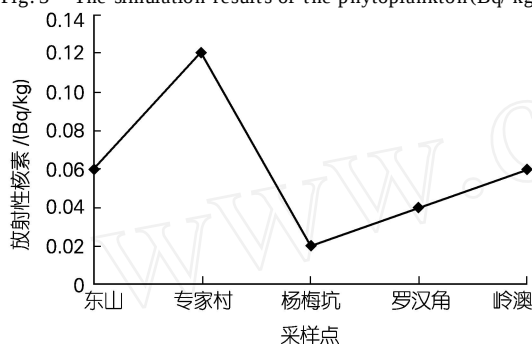


图4 浮游植物的数值模拟结果

Fig. 4 The simulation results of the phytoplankton

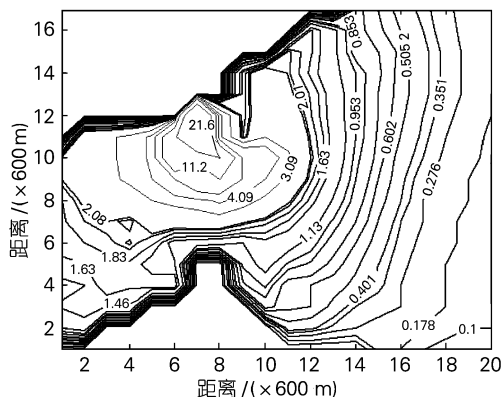


图5 沉积物的数值模拟结果(Bq/kg)

Fig. 5 The simulation results of the sediments(Bq/kg)

参考文献:

- [1] 张春森,李源新,胡国辉,等. 大亚湾核电站液态排出物 H-3 浓度场分布[J]. 暨南大学学报(自然科学版), 2001, 22(5): 51-58.
- [2] Garnier-lapace J, Vray F, Baudin P. A dynamic model for radionuclide transfer from water to freshwater fish [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1977, 98: 141-166.

The numerical simulation for the transfer of the radionuclide from the liquid releases of the nuclear power station to the ocean systems in the ecosystems

SU Ke

(Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Received: Sep., 20, 2004

Key words: Compartment model; radionuclide; ecosystems; transfer

Abstract: Using Alternating Direction Implicit (ADI) method, the numerical simulation of the contamination diffusion in the tide is carried out, and the distribution of concentration field of the western Daya Bay has been achieved. Then a dynamic radionuclide transfer model of ecosystems is constructed on the theoretical basis of compartment model analysis. The numerical simulation result shows the rule of the affection of the radionuclide from the nuclear power station to the ocean ecosystems. So we can use the compartment model of the ecosystems to predict the affections.

(本文编辑:谭雪静)