

^{137}Cs 在大鹏澳中迁移分布的数值模拟与预测

张俊丽¹, 陈家军^{1*}, 李源新², 黄乃明² (1. 北京师范大学环境科学研究所, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875; 2. 广东省环境辐射研究监测中心, 广东 广州 510300)

摘要: ^{137}Cs 作为广东核电站放射性排出核素之一, 具有高残留, 高积累的特点. 悬浮物对放射性核素的吸附沉降是影响海湾水体中核素迁移的重要机制之一. 为正确评价核电站放射性排出物对大亚湾海湾水域的影响, 建立了考虑悬浮物吸附沉降影响的深度平均二维对流扩散模型, 模拟了放射性核素 ^{137}Cs 在大鹏澳内的迁移分布状况, 并对未来湾内水质进行预测. 模拟预测表明若维持当前排放量, 未来 50 年内海湾中 ^{137}Cs 活度并没有呈持续上升趋势, 局部虽略有累积, 但活度值仍很小, 最大仅约 $4\text{Bq}/\text{m}^3$, 说明悬浮物吸附 ^{137}Cs 沉降对海湾的自净作用不容忽视.

关键词: 大鹏澳; ^{137}Cs ; 悬浮物; 吸附沉降; 对流扩散; 数值模拟

中图分类号: X591 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2003)01-0095-05

Numerical simulation and prediction on the migration and distribution of ^{137}Cs in Dapeng bay. ZHANG Jun-li¹, CHEN Jia-jun¹, LI Yuan-xin², HUANG Nai-ming² (1. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Institute of Environmental Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Guangdong Research and Monitoring Center of Environmental Radiation, Guangzhou 510300, China). *China Environmental Science*, 2003, 23(1): 95~99

Abstract: As one radionuclide of the radioactive effluent from GNPS (Guangdong Nuclear Power Station), ^{137}Cs has the characteristics of high retaining and accumulating. The adsorption sedimentation of radionuclide on suspended matter is an important mechanism affecting the radionuclide migration in the bay. In order to assess properly the effect of radioactive effluent from GNPS to Daya bay, a two-dimension depth-average advection-diffusion model considering the influence of the adsorption and sedimentation of suspended matters was developed to simulate the migration and distribution of ^{137}Cs in Dapeng bay; the water quality of the bay in future was forecasted. The simulation forecast showed that the radioactivity of ^{137}Cs in the following 50 years would not tend to increase when the present radioactive discharge load was maintained, except in local areas, but the value was still very low with maximum only $4\text{Bq}/\text{m}^3$, which indicated that the self-purification action of the bay from adsorption of ^{137}Cs to suspended matters and sedimentation should not be neglected.

Key words: Dapeng bay; ^{137}Cs ; suspended matters; adsorption sedimentation; advection-diffusion; numerical simulation

^{137}Cs 是核实验落下灰, 核事故释放和核设施运行排放到环境中的主要放射性核素之一, 它的半衰期长, 从放射性毒理学角度看, ^{137}Cs 属中毒性核素, 它在人类的一些食物链环节中能明显地浓集, 进入人体和生物后聚集到肌肉等软组织中, 不易从体内排出.

目前关于海湾污染物迁移模拟的研究已开展很多^[1-4], 但关于海湾放射性核素迁移转化数学模型的文献报道还不多. 排入海湾水体的核素与其他污染物不同, 它自身存在放射性衰变, 并

且和悬浮颗粒运动的关系密切, 必须考虑悬浮颗粒物运动对其迁移的影响, 其次它不能被生物所降解, 但可以被一些生物富集并随食物链迁移累积, 这些都极大地增加了数学描述和求解的难度. 已有的研究^[5]表明, 放射性核素在悬浮颗粒上的吸附和共沉淀是左右放射性核素在水体中运动的一个重要机制. ^{137}Cs 是碱金属元素, 在海水中以离

收稿日期: 2002-05-13

基金项目: 广东省环境保护局科技攻关项目(粤环 1999-310)

* 通讯联系人

子态存在,容易和黏土性物质结合在一起.在大鹏澳海域悬浮颗粒物中有相当部分是陆源的,具备黏土性质,能有效吸附 ^{137}Cs ,是 ^{137}Cs 由水相进入沉积物的载体^[6].故作者建立了考虑悬浮物吸附沉降影响的放射性核素迁移的二维平流扩散模型,模拟了大亚湾核电站排放废水中放射性污染物 ^{137}Cs 在大鹏澳内的迁移分布状况,在模型机理中着重考虑了对流、弥散、吸附和解吸、沉降、放射性衰变因素.

1 大鹏澳内 ^{137}Cs 迁移的平流扩散模型

1.1 潮流场

潮流是海岸带、海湾、海峡和潮汐河口地区的主要水动力表现形式之一,是这些地区最基本的物质运动,各类污染物质及热量的输送过程均伴随着潮流而运动.对于港湾和近岸水域,涨落潮、海流运动会使入海污染物质扩散、稀释、混合与沉淀,可降低污染物的浓度,显著改善水质^[7].在污染物的对流扩散模型中,潮流场是作为已知量提供的,故在进行水质模拟和评价前必须对潮流场有一较详细的了解,先算出流场.大亚湾的潮流性质主要为不正规半日潮流,作者根据典型点的实测流速,采用一阶趋势面加残差方法插值得到研究区域内涨潮、落潮的流场(图 1,图 2).

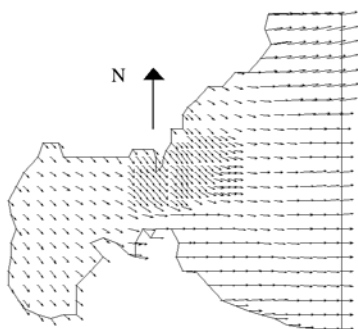


图 1 模拟流场(大潮、落潮)

Fig.1 Simulated current field(spring tide, ebb)

在模拟较短时间内湾内水质状况时需将涨、落潮流速场交替变换,当预测几十年后海域水质

状况时,将流速场分涨潮、落潮的意义已不大,为减少计算工作量并降低由于频繁变换流场带来的计算误差及不稳定性,可将涨、落潮流速场加权求和得到一平均流速场,带入模拟计算中.

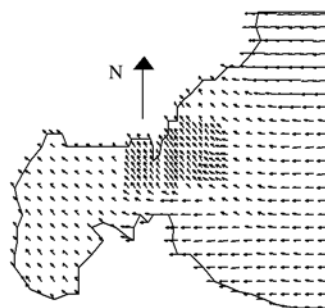


图 2 模拟流场(大潮、涨急)

Fig.2 Simulated current field(spring tide, flood)

1.2 污染物对流扩散方程

环境化学及海洋化学的研究证明,水体中许多污染物的迁移变化主要是通过悬浮颗粒物.即固体颗粒作为微量污染物的载体,决定着污染物的去向和归宿^[8]. ^{137}Cs 在海水中以离子态存在,容易和黏土性物质结合在一起.在大鹏澳海域悬浮颗粒物中有相当部分是陆源的,具备黏土性质,能有效吸附 ^{137}Cs ,是 ^{137}Cs 由水相进入沉积物的载体^[6].

^{137}Cs 在水体中的输送和交换分别发生在水柱层和底质层.输送过程描述为两种不同的类型,即水溶性输送和悬浮物输送.水溶性输送分为平流输送和扩散两种形式.悬浮物输送主要指吸附解吸及垂向沉浮.所以作者在模型机理中着重考虑了对流、扩散、吸附和解吸、沉降、放射性衰变等项内容.

考虑研究区域水深较浅的特点,采用深度平均二维平流扩散方程做为控制方程:

$$\frac{\partial(Hp)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(HK_x \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(HK_y \frac{\partial p}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (Hpu) - \frac{\partial}{\partial y} (Hpv) - H\lambda_d p - s_v c_s + s_m \quad (1)$$

式中: p 为海水中垂直方向的 ^{137}Cs 平均浓度,

Bq/m³; t 为时间, x, y 为空间坐标变量, m ; H 为水深, m ; u 为流速的 x 方向分量, m/s ; v 为流速的 y 方向分量, m/s ; K_x, K_y 分别为 x, y 方向上的扩散系数, m^2/s ; λ_d 为 ¹³⁷Cs 的衰减系数, s^{-1} ; s_v 为海水中悬移质的沉降速率, m/s ; c_s 为悬移质中 ¹³⁷Cs 的浓度, Bq/m^3 ; s_m 为单位截面排放负荷量, $Bq/(s \cdot m^2)$ 。其中悬移质沉降速率 s_v 定义为^[9]:

$$s_v = \frac{g}{18} \frac{d_i^2 (\gamma_s - \gamma_m)}{\mu_m}$$

(2)

悬移质吸附的 ¹³⁷Cs 浓度 c_s 定义为:

$$c_s = E c_{pi}, E = k_p p$$

(3)

式中: d_i 为悬移质粒径, m ; γ_s, γ_m 分别为固体和浆液容重, kg/m^3 ; μ_m 为悬液黏滞系数, $Pa \cdot s$; g 为重力加速度, m/s^2 ; E 为悬浮颗粒物对 ¹³⁷Cs 的吸附率; k_p 为自然状况下悬浮颗粒上 ¹³⁷Cs 的吸附解吸平衡常数, C_{pi} 为悬浮物的含量, kg/m^3 。

1.3 计算条件

采用加权剩余有限元法解对流-扩散方程, 对研究区域进行了任意四边形和三角形混合剖分, 在排放口和监测点处适当减小剖分网格间距, 增加网格密度。研究区域面积约 $6.35 \times 10^7 m^2$, 共形成剖分单元 462 个, 其中四边形单元 421 个, 三角形单元 41 个, 结点 494 个。

1.3.1 初始浓度 根据 1999 年 2 月大鹏澳内 18 个监测点的监测数据, 采用趋势面加残差方法插值得出研究区域内的浓度等值线分布作为初始浓度场。

1.3.2 边界条件 水陆交接处为闭边界, 溶质浓度通量为零, 与外部水域相通的湾东部及东北部顶端为开边界, 采用以下条件:

当退潮潮流流出时

$$\frac{\partial p}{\partial t} + v_n \frac{\partial p}{\partial n} = 0$$

(4)

当涨潮潮流流入时

$$p(x, y, t) = p^*(x, y, t)$$

(5)

式中: p^* 为给定的边界浓度分布。

1.3.3 时间步长 考虑到大亚湾潮流性质主要为不正规半日潮, 时间步长取为 6h。

1.3.4 污染源 大亚湾核电站排放为源项, 按持

续排放点源处理, 源项强度取 1999 年大亚湾核电站日平均排放量。

1.3.5 扩散系数 K_x, K_y 根据 Eider 型经验公式^[4]:

$$K_x = 5.93 \sqrt{g H} |u| / c$$

$$K_y = 5.93 \sqrt{g H} |v| / c$$

(6)

式中: $|u|, |v|$ 是流速绝对值的平均值, c 为谢才系数。

1.3.6 悬浮物吸附 $\gamma_s, \gamma_m, d_i, C_{pi}$ 可通过沉降实验和监测资料^[10]获得: $\gamma_s = 1.5 \times 10^3 kg/m^3, \gamma_m = 1.0 \times 10^3 kg/m^3, d_i = 5.0 \times 10^{-6} \mu m, C_{pi} = 9.0 \times 10^{-3} kg/m^3$; 常温下 μ_m 可通过资料查得^[11], $\mu_m = 1.009 \times 10^{-3} Pa \cdot s$ 。

1.3.7 其他参数 ¹³⁷Cs 半衰期 $T = 30.17y$, 谢才系数 $c = H^{1/6}/n$, 曼宁系数 $n = 0.05$, H 为水深取 $16m^*$ 。

2 大鹏澳内 ¹³⁷Cs 分布状况模拟

在大鹏澳水动力场基础上, 应用深度平均 ¹³⁷Cs 二维迁移数值模型, 并针对该数值计算过程, 开发了有限元计算程序 SEAMT, 模拟了 1999 年 4 月, 10 月, 2000 年 10 月, 湾内 ¹³⁷Cs 分布情况。

表 1 是各监测点实测值与计算值比较。图 3 是 1999 年 4 月 ¹³⁷Cs 的数值模拟结果和监测站站位分布图。

表 1 各站位不同时间 ¹³⁷Cs 活度(Bq/m³)监测值与模拟值比较

Table 1 Comparison between observed and calculated radioactivity(Bq/m³) of ¹³⁷Cs at four monitoring sites in different periods

监测站	1999-04		1999-10		2000-10	
	实测值	模拟值	实测值	模拟值	实测值	模拟值
W4	2.89	2.45	2.49	2.44	2.44	1.98
W9	2.11	2.45	2.54	2.72	2.57	2.64
W11	2.21	2.33	2.16	2.36	2.41	2.54
W12	2.28	2.36	2.54	2.39	2.64	2.39

从表 1, 图 3 模拟结果中可以看出, 数值模拟结果与实测值符合较好, 作者所用的深度平均对流扩散模型, 考虑了悬浮物吸附沉降影响, 可以较

* 李源新, 胡国辉, 张春鄰, 等. 压水堆核电站液态流出物海洋排放的环境影响关键核素有关研究及湾内海洋生态相关研究 [R]. 2000.93-98.

好地模拟海湾中污染物的迁移扩散状况.通过对大鹏澳内放射性核素 ^{137}Cs 分布的模拟分析,检验了本模型的正确性和有效性,并可进一步进行湾内各区域 ^{137}Cs 的浓度分布定量预测,为正确评价核电站放射性排放物的影响,及进行核电站优化排放提供了科学的决策依据.

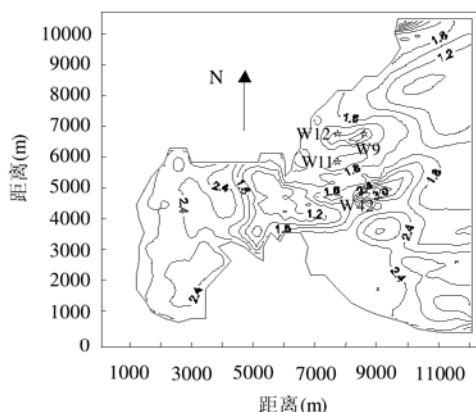


图3 1999年4月大鹏澳内 ^{137}Cs 的平均浓度分布及监测站位置分布

Fig.3 The distribution pattern of ^{137}Cs in April, 1999 and sampling sites in Dapeng bay
Cs 的浓度单位为 Bq/m^3

3 大鹏澳 ^{137}Cs 水质预测

利用上述数值模拟与实测值拟合过程中确定的参数可以预测未来若干年大鹏澳海域内水相中 ^{137}Cs 的浓度,并作出 50 年后湾内海水中 ^{137}Cs 的浓度分布等值线图(图 4).

从图 3,图 4 中可以看出,50 年后湾内水质没有太大的变化,水质状况稳定.与 1999 年 4 月浓度场相比,50 年间,浓度峰值相差仅 $1\text{Bq}/\text{m}^3$,这充分说明沉降项与衰变项对湾内的水质净化产生了作用.根据上述预测结果,可以推断若维持目前 ^{137}Cs 的排放量,海水中悬浮颗粒物量没有大的减少,则由于悬浮颗粒物的吸附、 ^{137}Cs 的衰变对海水的自净作用会与核电站的低量排放产生的不良影响相抵消,从而使湾内水质稳定,几十年后也不会有明显的恶化,不过由此会导致水相中 ^{137}Cs 向沉积相中转移,从而对底质生态系统产生潜在

的、长久的影响,故有必要加强大鹏澳海域的底质生物监测.

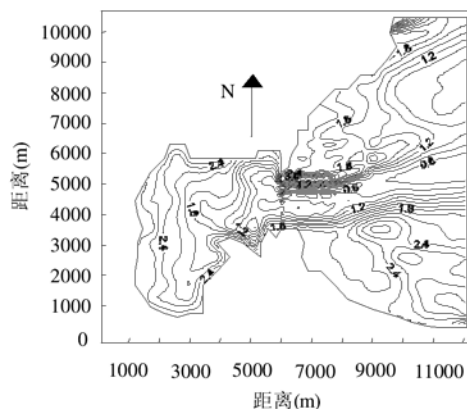


图4 50年后大鹏澳内 ^{137}Cs 的浓度分布

Fig.4 The distribution pattern of ^{137}Cs 50 years later in Dapeng bay
注同图3

4 结论

4.1 采用深度平均二维对流扩散模型对大鹏澳海域内的核电站排放废水中的放射性核素 ^{137}Cs 做了实际浓度场的数值模拟计算,结果表明,湾内水流由于流速缓慢,与湾外水流交换能力低,从而使污染物扩散条件差,尤其是西部湾顶,污染物容易在此滞留,在排放口附近局部水体中,有污染物累积现象.从海湾 ^{137}Cs 水质监测资料及模拟预测分析中可看出,近些年来海湾 ^{137}Cs 浓度保持稳定,没有呈现持续上升趋势,说明 ^{137}Cs 排放与其对流扩散稀释和吸附净化处于平衡状态,同时证明悬浮物吸附 ^{137}Cs 沉降对海湾水体的自净作用不容忽视.

4.2 通过大鹏澳附近水域放射性核素扩散条件的研究,建立了一套可行的计算机软件和研究方法,为正确评估核电站放射性排放物对周围海域的影响提供了科学依据,并为当地海域的环境管理提供了决策依据.

参考文献:

- [1] 王泽良,陶建华.缓坡潮间带海湾的污染物输移扩散数值模拟

- 方法研究 [J]. 海洋学报, 1998, 20(2): 120-127.
- [2] 窦振兴, 罗远谕, 黄克辛, 等. 渤海潮流污染扩散的数值模拟 [J]. 海洋学报, 1982, 4(6): 667-678.
- [3] 王泽良, 王日新, 陶建华. 渤海湾流场以及污染物分布的数值模拟研究 [J]. 海洋与湖沼, 1999, 30(2): 224-229.
- [4] 罗家海, 潘南明, 汪道明. 汕头港湾附近水域潮流特征和污染物扩散的数值计算—汕头港湾附近水域污染物的扩散数值模拟 [J]. 海洋环境科学, 1997, 16(2): 46-49.
- [5] 李培泉. 海洋沉积物与放射性 [A]. 海洋放射性及其污染 [C]. 北京: 科学出版社, 1983. 178-197.
- [6] 蔡福龙. ^{137}Cs 在中国沿岸海域环境中的行为特征 [A]. 台湾海峡及邻近海域海洋科学讨论会论文集 [C]. 北京: 海洋出版社, 1995. 319-325.
- [7] 李孟国, 曹祖德. 海岸河口潮流数值模拟的研究与进展 [J]. 海洋学报, 1999, 21(1): 111-125.
- [8] 杨桂朋. 海水中有有机物在粘土或沉积物上吸附特性的模拟研究 [J]. 海洋科学, 1999, 5: 60-63.
- [9] 江文胜, 孙文心. 渤海悬浮颗粒物的三维输运模式 [J]. 海洋与湖沼, 2000, 31(6): 682-687.
- [10] 徐恭昭. 大亚湾环境与资源 [M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1989. 66-71.
- [11] 何云萼. 物理化学实验 [M]. 成都: 四川大学出版社, 1993. 338.
- 作者简介:** 张俊丽 (1978-), 女, 河南南阳人, 北京师范大学环境科学研究所读硕士生, 主要从事环境模拟与污染治理研究. 发表论文 5 篇.