

核电厂海域放射性后果评价系统

郭猜¹, 林权益¹, 岳会国¹, 杨静², 乔清党¹

1. 环境保护部核与辐射安全中心, 北京 100082

2. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081

摘要 基于中国海域海流预报数据和核电厂近岸海域的高分辨率岸线及海底地形资料, 建立了核电厂海域放射性后果预测与评价系统。该系统采用成熟的海流预报模型和输运扩散数值模型及直观的剂量评估方法, 可对不同核电厂址核事故下液态放射性物质的排放进行污染物输运路径模拟, 并可以在中国特定核电厂的近岸海域进行精细化3维后果评价, 为应急响应行动提供决策技术支持。本文针对宁德核电厂进行了假想核事故案例计算, 结果表明一般情况下模拟海域内潮流类型为半日潮流, 落潮流向偏东, 涨潮流向偏西, 海流速度较小, 扩散过程缓慢, 会在近岸海域积累较高的放射性浓度。

关键词 海流数值预报; 核素扩散数值模拟; 核事故后果评价

2011年3月日本福岛发生核事故, 这是世界上首次发生放射性物质向海洋环境中大规模直接排放的核事故, 事故期间约有10~20 PBq的¹³¹I和1~6 PBq的¹³⁷Cs直接排放到海洋^[1-2]。福岛核事故发生后, 多种海洋扩散模型被用于预测放射性物质在海洋中的输运扩散行为, 并取得了与监测数据较为一致的结果^[3-5]。放射性核素进入海洋环境后, 很难在第一时间获取大量的现场监测数据, 放射性核素的影响范围及程度也很难单独通过监测手段进行预测和评价^[6]。在核事故情况下, 由于环境中可能存在较高的放射性污染水平及应急响应行动的紧迫性, 需要使用数值预报模型来预测放射性核素的影响范围及程度, 为核事故应急决策提供技术支持^[7]。

为了应对中国滨海核电厂址核事故情况下放射性物质释放进入海洋环境的可能性, 本文建立了“核电厂海域放射性后果评价系统”(nuclear-power-plant oceanic radiation consequence analysis system, NORCAS), 针对此类应急情景提供应急准备和应急响应上的技术支持。

1 系统概述

“核电厂海域放射性后果评价系统”设计为对中国不同滨海核电厂址核事故状态下液态放射性物质进入海洋环境后产生的辐射后果进行快速评价, 同时针对宁德核电厂周边海域开发三维海流预报模型和扩散模型, 实现对辐射后果的精细评价(后续将陆续建立其他核电厂的精细评价)。为满足核事故应急响应工作对系统操作简便性与计算时效性的要求, 系统基于服务器、PC机为硬件平台进行开发, 并使

用国家海洋环境预报中心大型机完成部分运算量较大的海流预报及三维扩散模拟过程, 并通过专线进行数据传输。

系统研发的技术路线如图1所示^[8], 主要由源项输入模块、中国海域评价子系统、近岸海域评价子系统、剂量计算模块组成。中国海域评价子系统、近岸海域评价子系统均采用成熟的物理模型, 在不同尺度和精度下进行放射性核素的迁移扩散模拟。

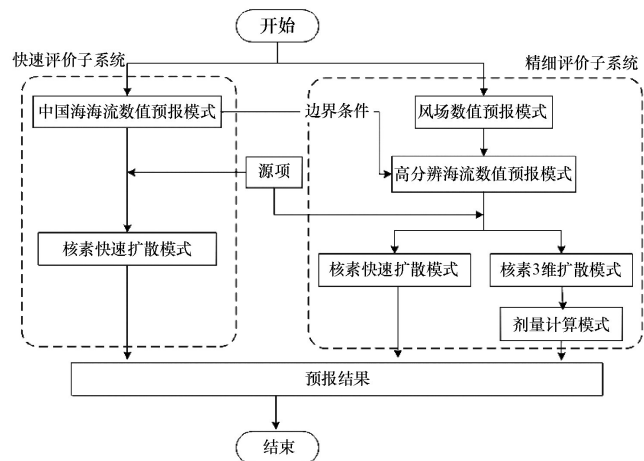


图1 系统研发的技术路线

Fig. 1 Technology roadmap of system development

图2展示了“核电厂海域放射性后果评价系统”的主界面。系统采用浏览器/服务器(B/S)模式结构, 使用IE浏览器

收稿日期: 2017-01-02; 修回日期: 2017-06-09

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2012AA050907)

作者简介: 郭猜, 工程师, 研究方向为核设施事故应急及后果评价, 电子信箱: guocai1234@163.com; 乔清党(通信作者), 研究方向为核事故应急, 电子信箱: qiaoqingdang@163.com

引用格式: 郭猜, 林权益, 岳会国, 等. 核电厂海域放射性后果评价系统[J]. 科技导报, 2017, 35(13): 45-51; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.11.006



图 2 “核电厂海域放射性后果评价系统”主界面
Fig. 2 Main interface of “NORCAS”

进行登录及操作。海流预报数据和扩散浓度结果均使用地理信息(GIS)平台进行直观展示,界面最上方是案例计算、结果展示等基本功能按钮。

1.1 中国海域评价子系统

中国在运核电厂均为沿海厂址,中国海域评价子系统可以在 30 min 内评估各核电厂核事故情况下放射性物质在南海、黄海、东海和渤海海域内的迁移扩散轨迹,以满足核事故应急工作对时效性的要求。

中国海域评价子系统使用的海流预报数据来自国家海洋环境预报中心业务化系统中的西北太平洋温盐流预报模型。该模型计算范围为 $3^{\circ}\text{N}\sim 52^{\circ}\text{N}$ 、 $99^{\circ}\text{E}\sim 158^{\circ}\text{E}$,覆盖了中国全部海岸线,水平方向网格分辨率为 0.05° ,垂直方向分为 22 层。西北太平洋温盐流预报模型主要预报未来不少于 5 d 内的温盐流,其中的表层海流预报产品作为中国海域评价子系统的环境动力输入,每 24 h 更新 1 次预报结果。用于粒子扩散计算的主要输出参数包括各网格点处东向流速及北向流速,单位为 m/s。

放射性核素的扩散模拟采用粒子 2 维扩散模式,这种方法把放射性核素分成许多离散的小粒子模拟其在海水中的运输扩散过程,主要考虑其在平流作用下的整体位移和在剪流和湍流作用下的扩散,即将粒子扩散过程分成平流过程和扩散过程 2 个部分。平流过程主要采用拉格朗日计算方案,并考虑了风应力对粒子输移的直接作用。平流漂移位移的计算公式为

$$\frac{dx}{dt} = v_a(x, t) \quad (1)$$

式中 dx/dt 为位移 x 对时间 t 的变化率, v_a 为海流的流速和风导输移速度的合成,求解时采用改进的欧拉方法,即二阶求解方法,步长定为 10 min。

湍流扩散则是由于水流的随机性脉动所导致的粒子空间位移。 Δt 时间内粒子的随机走动距离 x' 为

$$x' = \xi \sqrt{6K\Delta t} \quad (2)$$

式中, ξ 为 $[-1, 1]$ 之间的均匀分布随机数; K 为扩散系数。采用

粒子云团方差随时间线性增加的 Fick 扩散,这种扩散意味着随机走动距离的方差和扩散系数为不随时间改变的常数,即有 $\langle x_i'^2 \rangle = \sigma_1^2$, $K = \frac{1}{2} \frac{\sigma_1^2}{\Delta t}$ 。其中 x_i' 为时刻粒子的随机走动距离, $\langle \rangle$ 代表对所有粒子求平均, σ_1 为第一个时间步长结束时粒子云团的方差。

1.2 近岸海域评价子系统

近岸海域评价子系统目前针对宁德核电厂址开发,可以在事故发生后几个小时内给出宁德周边 50 n mile (1 n mile = 1852 m) 范围内的放射性核素三维精细扩散结果,为应急响应行动提供充足的技术支持。

宁德核电厂附近海域的数值模拟研究采用美国马萨诸塞大学(University of Massachusetts, Dartmouth)海洋科技研究院和美国伍兹霍尔海洋研究所(Woods Hole Oceanographic Institution)联合开发的 FVCOM (An Unstructured Grid, Finite-Volume Coastal Ocean Model) 海洋数值模式^[9]。该模式是一个三维非结构网格、原始方程、有限体积的海洋环流模型,适用于浅海陆架及近海河口的生态系统动力学过程研究。模式在水平方向上采用非结构的三角形网格,可以在研究海域内对模型网格进行任意加密以满足近岸、岛屿岸界的精确拟合;垂直方向上采用 σ 坐标,可以很好地拟合复杂的海底地形。该模式的主要控制方程包括动量方程、连续方程、盐度扩散方程、温度扩散方程、状态方程等,采用 Mellor-Yamada 2.5 层湍流封闭模式用于计算垂直混合,采用 Smagorinsky 涡旋参数化方案用于计算水平混合。

基于宁德核电厂附近海域的高分辨率岸线及海底地形资料,模型在 $119.5^{\circ}\text{E}\sim 121.3^{\circ}\text{E}$ 、 $26^{\circ}\text{N}\sim 27.5^{\circ}\text{N}$ 的海域范围内共使用 1.2256 万个网格节点划分了 2.2138 万个非结构三角形网格单元(图 3),网格划分采用近密远疏的原则。模式在宁德核电厂可能的源项释放点及近岸区域处水平分辨率约 40 m(图 4),远离岸线区域分辨率逐渐降低,至开边界区域水平分辨率约 5000 m;并在垂直方向上分为 10 个 σ 层。图 4 标注

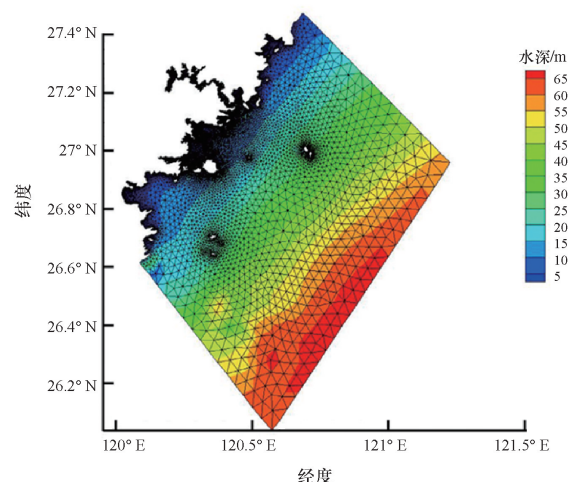


图 3 研究区域网格分布
Fig. 3 Mesh distribution in studied area

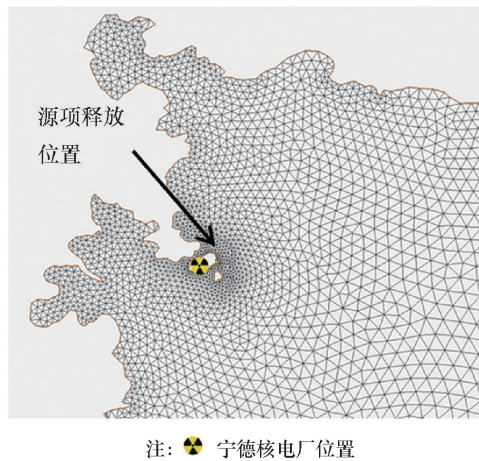


图4 释放点附近网格分布

Fig. 4 Mesh distribution near the release point

了宁德核电厂位置及核事故可能的源项释放位置。系统选择的源项释放位置为宁德核电厂排水口处。

模式的开边界由俄勒冈州立大学潮汐数据反演得到,数据集由 Topex Poseidon 卫星高度计资料和 61 个验潮站资料进行同化分析,得到水位数据作为模式的开边界条件。模式的岸边界进行了干湿网格判断,未考虑径流输入的影响。

基于 FVCOM 模式对宁德核电厂近岸海域进行建模后,可以预报模拟区域内的三维海流。同时,应用 FVCOM 模式自身的物质传输扩散模块,与海洋水动力模块衔接,可以实现核物质输运扩散数值模块与环境动力模块的耦合计算,给出放射性物质在模拟区域内的三维浓度分布。模式的主要输出参数见表 1。

表 1 三维扩散模式输出参数

Table 1 Output parameters of 3-dimensional diffusion model

参数	物理含义	单位
<i>lon</i>	网格单元节点的经度坐标	
<i>lat</i>	网格单元节点的纬度坐标	
<i>time</i>	模型计算时间	h
<i>u</i>	网格单元中心点的东方向流速	m/s
<i>v</i>	网格单元中心点的北方向流速	m/s
<i>zeta</i>	网格单元节点的水位	m
<i>dye</i>	网格单元节点的污染物浓度	相对值
<i>wv</i>	网格单元中心点的垂向流速	m/s

由于宁德近岸海域三维数值模型的分辨率较高,大量模型计算过程在大型机上完成。模型每 24 h 更新未来 5~7 d 内的模拟结果,通过数据专线传输至系统服务器端,在考虑源项及核素半衰期对结果的影响后,供用户分析使用。

1.3 剂量计算与后果评价

系统内置了剂量计算模式,用来根据海水中放射性物质的浓度进行海洋生物和公众剂量的评估。

海洋生物剂量的评估方法基于欧盟 ERICA 框架下评估电离辐射生态风险的 ERICA 程序,计算参数参考了欧洲生物辐射效应数据库 (FREDERICA) 及国际原子能机构的推荐值^[10-11]。模式考虑研究海域内的浅海鱼类,并作平衡态假设,即放射性核素在生物体内、海水中、底泥中的浓度存在平衡^[12]。据此计算放射性核素对生物造成的总剂量率 D 为

$$D = D_{in} + D_{ext} \quad (3)$$

式中 D_{in} 及 D_{ext} 分别为生物所受内、外照射剂量率。

模式根据 FREDERICA 推荐的筛选水平 $10 \mu\text{Gy/h}$ 判断事故发生后,海水中的放射性浓度水平是否会对水生生物造成长期辐射后果。

公众剂量的评估方法参考正常运行状态下公众所受辐射剂量的计算方法^[13],同样基于平衡态假设,主要考虑核电厂周边关键人群组的食物消费及最大生活习惯因子,据此分别计算食入受污染海产品所致的个人内照射剂量及水上活动所致的个人外照射剂量,并给出参考总剂量。

1.4 模式验证

为验证系统建立的宁德近岸海域 3 维数值模型的可靠性,利用宁德附近海域的定点潮位观测与海流观测数据对模型的预报结果进行了验证。潮位观测数据及海流观测数据取自《福建宁德核电厂址水文项目全潮水文观测成果报告》及《宁德核电厂三、四号机组环境影响报告书》。

潮位观测站点共包括宁德核电厂周边北霜、沙埕、三沙及秦屿(厂址所在位置)、长门和台山 6 个站点。计算的潮位与 6 个站位的实测资料对比统计结果见表 2,模型计算的水位与观测值的平均绝对误差不超过 0.2 m,模拟结果可以很好地反映宁德海域的水位变化。

表 2 潮位计算误差统计表

Table 2 Error statistics of tidal level simulation

站点	平均绝对误差/m	
	夏季	冬季
长门	0.1500	0.1696
台山	0.0948	0.1509
北霜	0.0927	0.1944
沙埕	0.0868	0.1907
三沙	0.1117	0.1802
秦屿	0.1103	0.1849

海流验证使用了 13 个海流观测站位的测量结果,经与模拟结果对比,强流时(流速 $\geq 0.5 \text{ m/s}$)海流流速相对误差不超过 35%,流向误差不超过 50° 。各站点夏季中潮时各深度的海流流速、流向相对误差对比结果见图 5(H 为该站点处总水深)。模型的海流预报结果可以满足进行精细后果评价的要求。

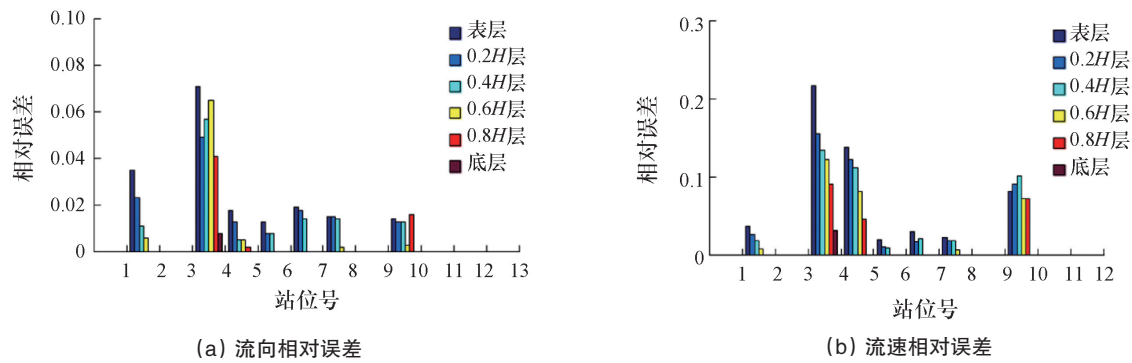


图5 各站点夏季中潮海流流速和流向相对误差对比(夏季中潮时流速 ≥ 0.5 m/s)
Fig. 5 Relative error statistics of flow speeds and directions in different sites
(summer and moderate tide, flow speed ≥ 0.5 m/s)

2 系统应用

应用核电厂海域放射性后果评价系统对宁德核电厂假想核事故进行评价。假定事故发生时间为2016年4月20日0时,该段时间内的海流较为稳定,无极端天气影响。事故向海洋环境中持续排放放射性核素 ^{137}Cs ,总排放时间为7 d,排放源项的浓度固定为 2×10^{10} Bq/m 3 。

2.1 1 d内的扩散模拟

使用近岸海域评价系统对海洋环境中的放射性后果进行精细3维评价,事故发生后1 d内的表层海面扩散结果如图6(a)~图6(e)所示。就假定释放案例而言,排放开始后1 d内的浓度分布结果具有以下特点。

- 1) 放射性物质浓度高于 10^3 Bq/m 3 区域分布在释放点附近约6 km以内的近岸海域内,在释放点以东的海域形成了长约6 km、宽约4.5 km的放射性浓度较高区域。
- 2) 研究海域内海流流速较小,放射性物质扩散速度也较慢;在模拟时间1 d内,距源项释放位置最远8 km处放射性浓度可以达到1 Bq/m 3 ,相对于源项的稀释系数为 2×10^{10} 。
- 3) 放射性物质的扩散和浓度分布明显受潮流的影响呈

一定的周期性变化,释放开始后受放射性物质污染的海洋区域面积渐进式增大。

2.2 7 d内的扩散模拟

使用近岸海域评价子系统对海洋环境中的放射性后果进行精细3维评价,事故发生后7 d内(最后结果为第6天的第23小时)的扩散结果如图6(f)~图6(i)所示(为了达到更好的展示效果,图6(a)~图6(e)与图6(f)~图6(i)采用了不同的比例尺)。

就假定释放案例而言,排放开始后7 d内的浓度分布结果具有以下特点。

- 1) 海水中放射性物质浓度高于 10^3 Bq/m 3 的区域分布在释放点附近约17 km以内的近岸区域内,主要沿核电厂附近海岸向东北向、南向扩散,东北向扩散距离约17 km,南向扩散距离约16 km。
- 2) 研究海域内海流流速较小,放射性物质扩散速度也较慢;在模拟时间7 d内,放射性浓度达到1 Bq/m 3 ,相对于源项的稀释系数为 2×10^{10} 时,距释放点最远处位于东北向30 km,南向25 km处。

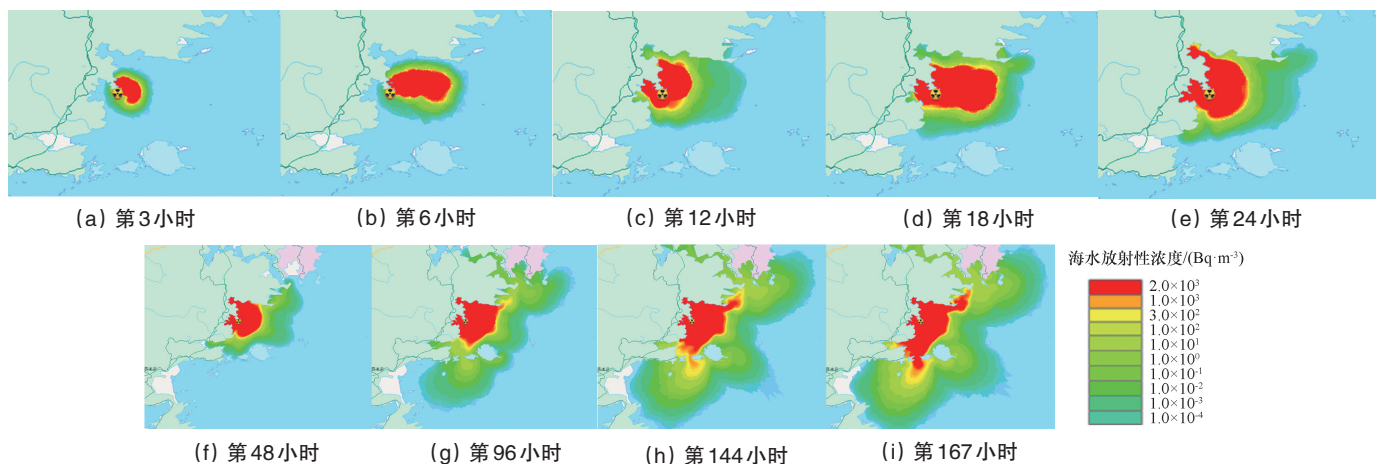


图6 排放开始后各时间海水放射性浓度分布
Fig. 6 Concentration distribution after discharge

3) 放射性物质的扩散和浓度分布明显受潮流的影响呈一定的周期性变化。释放开始后放射性浓度达到释放源项浓度 1/1000 的海域面积随释放时间变化的曲线如图 7 所示。据图分析, 污染总面积呈震荡式增加的趋势, 即在约 12 h 的周期内, 前半周期面积增加较快, 后半周期面积增加缓慢或减少。震荡的周期约 12 h, 与潮流变化周期一致。

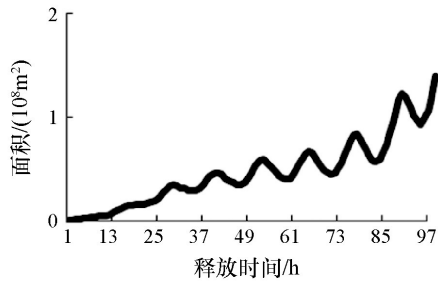


图 7 释放开始后 7 天内浓度高于源项浓度 1/1000 的海域面积随释放时间变化曲线

Fig. 7 Sea area with concentration above 1/1000 of source concentration in 7 days after discharge

4) 图 8 展示了在源项释放点以东 2~10 km 处进行 3 维剖面钻取的结果。图 8 中灰色区域为海底地形高度。从 3 维剖面图看, 同一位置海底浓度与海面浓度差异不大。事实上, 在 σ 坐标系下的海面层和海底层浓度场并无显著区别, 对同一位置的不同深度的浓度进行对比, 最大相差约 2 倍。

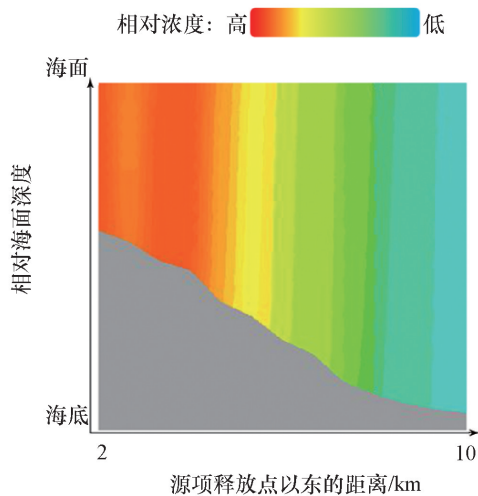


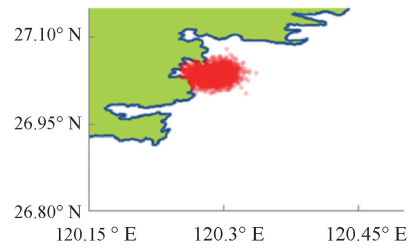
图 8 释放源项以东 2~10 km³ 维剖面钻取结果

Fig. 8 3-dimensional profile drilled between 2 km and 10 km east from discharge point

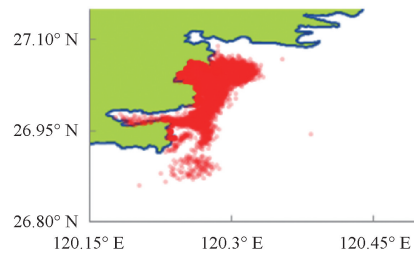
2.3 二维扩散模拟

使用粒子二维扩散模式对案例进行模拟分析, 模拟计算的开始时间、使用的海流预报数据与精细 3 维评价相同。第 2 日、第 4 日 0 时模拟的粒子分布如图 9 所示。

二维扩散模拟结果显示, 第 2 日放射性物质主要向释放



(a) 第 2 日 0 时粒子分布



(b) 第 4 日 0 时粒子分布

图 9 二维扩散模拟结果

Fig. 9 2-dimensional diffusion simulation result

点以东海域扩散, 第 4 日放射性物质主要向释放点以东、以南海域扩散。二维扩散模拟预测的主要扩散方向与精细 3 维评价结果基本一致, 可以用于对放射性物质迁移扩散轨迹的快速预测。

3 结果与讨论

3.1 基于模拟结果的应急响应策略制定

根据模拟结果, 可以得出以下结论, 作为针对此案例应急响应策略制定的技术依据。

1) 宁德近岸海域海流流速较小, 为 0.2~0.7 m/s (涨落潮流速相对较大), 海水中放射性物质扩散缓慢。在发生放射性释放后的 1 d 内, 释放点 6 km 距离处放射性浓度超过 10^3 Bq/m³; 释放后 7 d 内, 释放点 17 km 距离处放射性浓度超过 10^3 Bq/m³, 相对源项的稀释系数为 2×10^0 。

2) 放射性物质在释放进入研究海域后, 主要向释放点以东、以南方向扩散, 并倾向于集中分布在海岸线附近。因此需要在研究海域东北、南两个方向重点开展海域放射性核素监测, 并严格要求非应急工作人员远离海岸区域, 以免受到过量辐射剂量。

3) 在释放点 5 km 范围以内, 在模拟时间 1 d 内 ¹³⁷Cs 浓度即高于 1×10^4 Bq/m³。使用系统内置的剂量计算模型进行评估, 在此浓度下, 海域内主要水生生物浅水鱼所受剂量率为 9 μ Gy/h, 接近对水生生物造成长期后果的筛选水平; 如果不进行捕捞及食用限制, 则民众所受年剂量将超过 1 mSv/a, 但尚未达到需进行干预的剂量水平; 进行水上活动所受剂量率为 5×10^{-4} μ Sv/h, 在海域表面进行应急响应行动无显著风险。随时间推移, 研究海域内的放射性浓度继续升高, 会造

成更加严重的辐射后果,加之研究海域扩散条件较差,因此有必要采取必要的海产品食用控制。

4) 宁德核电厂址海区属正规半日潮区,区域内潮流类型为半日潮流,潮流流速较小,落潮流向偏东,涨潮流向偏西^[14]。受半日潮的影响,放射性物质在研究海域内的浓度分布呈一定的周期性扩散趋势。在涨潮流起主导作用的期间,浓度较高海域的面积增长缓慢甚至缩小;如需对海水中放射性核素采取吸附等处理手段,可以选取在该时间段内集中处理,以减少需要处理的海域面积和相应的工作量。

3.2 系统局限与改进

从上述讨论可以看出,核电厂海域放射性后果评价系统已经具备了初步对核事故在海域环境中造成的放射性后果进行评价分析的能力。

考虑到实际核事故情况下源项核素成分、输运扩散过程、放射性在生物体内富集过程的复杂性,系统在以下各方面的研究仍存在一定局限,需要进一步深入研究。

1) 目前输运扩散模式使用的方法对于溶解在海水中的放射性核素是适用的。放射性核素在海水中的溶解性大小可以通过放射性核素的分配系数 K_d (平衡态下沉积物中放射性核素的浓度与海水中放射性核素浓度的比值)区分。对于 $K_d < 10^3 \text{ m}^3/\text{kg}$ 的核素,如 ^{137}Cs 和 ^{131}I ,将系统的评价结果用于应急响应工作是合理的^[15]。但 K_d 较大的放射性核素与悬浮粒子或沉积物的吸附过程会明显影响核素的扩散行为,因此需要在未来的研究中进一步考虑海水中悬浮粒子与沉积物对扩散过程和核素浓度的影响。

2) 系统使用的海流预报模型的有效性通过潮位观测与海流观测数据进行了验证,但难以实现对输运扩散结果的验证。在类似研究中,曾使用已发生的核事故在水体中产生的放射性核素浓度场或沉积场对模型进行验证^[16-17]。在中国海域范围内,不存在类似的条件,需要探索其他适当、可行的验证方法。

3) 目前系统采用的剂量评价模型假定水体中放射性核素浓度与生物体内的放射性核素浓度存在静态平衡。但在事故情况下,大量放射性核素在短时间内进入水体,基于生物食物链关系的动态核素摄入模型^[18]可以更好地描述生物所受剂量。

4 结论

“核电厂海域放射性后果评价系统”具备了对核事故情况下释放进入海洋环境的放射性物质所造成的辐射后果进行评价的能力,可以精细预测未来7 d内放射性物质在海洋环境中的三维浓度分布,作为应急响应行动的技术依据。

对宁德近岸海域的模拟分析表明,宁德核电厂近岸海域流速较小,排放的放射性物质在短时间内倾向于在近岸海域内积累相对较高的放射性浓度。应急情况下,需要结合监测数据,采取吸附等手段去除海水中的放射性污染物。

参考文献 (References)

- [1] International Atomic Energy Agency. The Fukushima Daiichi accident report by the director general[R]. Austria: International Atomic Energy Agency, 2015: 106-107.
- [2] Li B, Chen Y Y. Post-accident leakage and discharge of radioactive waste liquid at Fukushima Dai-ichi NPP and its environmental impacts [J]. Radiation Protection, 2012, 32(6): 336-347.
- [3] Perić R, Brovchenko I. A new comparison of marine dispersion model performances for Fukushima Dai-ichi releases in the frame of IAEA MODARIA program[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2015, 150: 247-269.
- [4] Maderich V, Bezhenar R, Heling R, et al. Regional long-term model of radioactivity dispersion and fate in the northwestern Pacific and adjacent seas: Application to the Fukushima Dai-ichi accident[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2014, 131: 4-18.
- [5] Nakano M, Povinec P P. Long-term simulations of the ^{137}Cs dispersion from the Fukushima accident in the world ocean[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2012, 111: 109-115.
- [6] du Bois P B, Laguionie P, Boust, et al. Estimation of marine source-term following Fukushima Dai-ichi accident[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2012, 114: 2-9.
- [7] Wang S W, Qiao Q D, et al. Assessment of radiological consequence of coastal seawater after coastal nuclear power plant accident[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(6): 176-180.
- [8] Qiao Q D, Guo C. Method research of radiation consequence evaluation in the ocean discharged from nuclear accident[J]. Nuclear Safety, 2015 (2): 12-19.
- [9] Chen C S, Beardsley R C, Cowles G. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model FVCOM user manual[J]. Oceanography, 2006, 19(1): 78-89.
- [10] Valentin J. A framework for assessing the impact of ionizing radiation on non-human species: Publication 91[J]. Annals of the ICRP 33, 2003, 33(3): 201-270.
- [11] Larsson C M. The FASSET framework for assessment of the impact of ionising radiation on non-human species[J]. Journal of Radiological Protection, 2004(24): A1-A12.
- [12] Bai X P, Du H Y, Zheng W. Comparative study of RESRAD-BIOTA and ERICA programs in assessment of radiation effect on pelagic fish [J]. Radiation Protection, 2011, 31(2): 65-71.
- [13] Ma W L, Cao J Z, Fang D. Analysis and study on generic models for use in assessing the impact of radioactive liquid effluent to the environment[J]. Radiation Protection, 2008, 28(2): 90-96.
- [14] Suzhou nuclear power research institute. Environmental impact statement on unit 3 and unit 4[R]. Ningde: Fujian Ningde Nuclear Power Co.Ltd., 2009.
- [15] Harms I H, Karcher M J, Burchard H. Modelling radioactivity in the marine environment: The application of hydrodynamic circulation models for simulating oceanic dispersion of radioactivity[J]. Radioactivity in the Environment, 2003(4): 55-85.
- [16] Koziy L, Maderich V, Margvelashvili N, et al. Three-dimensional model of radionuclide dispersion in estuaries and shelf seas[J]. Environmental Modelling and Software, 1998, 13(5/6): 413-420.
- [17] Heldal H E, Vikebø F, Johansen G O. Dispersal of the radionuclide caesium-137 (^{137}Cs) from point sources in the Barents and Norwegian Seas and its potential contamination of the Arctic marine food chain:

Coupling numerical ocean models with geographical fish distribution data[J]. Environmental Pollution, 2012, 164: 1-10.
[18] Lepicard S, Heling R, Maderich V, POSEIDON/RODOS models for ra-

diological assessment of marine environment after accidental releases: Application to coastal areas of the Baltic, Black and North Seas[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2004, 72: 153-161.

An oceanic environment radiation consequence analysis system for nuclear power plants

GUO Cai¹, LIN Quanyi¹, YUE Huiguo¹, YANG Jing², QIAO Qingdang¹

1. Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100082, China
2. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China

Abstract Based on ocean current numerical forecast in China Seas, high-resolution coast line and bathymetric topography data of nearshore area, an oceanic radiation consequence analysis system has been established for nuclear power plants. The developed system adopts models used for current forecast, radioactive effluent numerical dispersions and radiological dose assessment. The system can simulate the dispersion path of radioactive effluent in various domestic nuclear power plants, and can make sophisticated three-dimension assessment in the nearshore area of a specific nuclear power plant. The assessment result can provide technical support for decisions on emergency response action. This paper provides an assessment result on an assumed nuclear accident in the Ningde Nuclear Power Plant. The assessment result shows that in the assumed situation, the ocean current in the simulated sea area is slow and semi-diurnal, which heads eastward during falling tide, westward during rising tide. The slow ocean current causes a slow diffusion process, thus high radioactive concentration will be accumulated in the near shore area.

Keywords ocean current numerical forecast; nuclide diffusion numerical simulation; consequence assessment for nuclear accident

(编辑 王志敏)