

福岛核事故释放的 ^{137}Cs 在西北太平洋海水中 运输的模拟与预测

赵云霞^{1,2,3}, 韩磊^{2,3*}, 曲大鹏^{2,3}, 赵昌^{2,3}, 庄展鹏^{1,2,3}, 袁业立^{1,2,3}

(1. 中国海洋大学 海洋与大气学院, 山东 青岛 266100; 2. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;
3. 青岛海洋科学与技术国家实验室 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266071)

摘要:2011-03-11 日本福岛核电站放射性物质发生泄漏事件, 本研究基于 MASNUM (Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling) 海洋环流模式, 建立了西北太平洋海洋放射性物质运输扩散模式, 对事故释放的 ^{137}Cs 在海洋中的运输和扩散过程进行了 20 a 的模拟与预测。根据与观测资料的比较, 验证了所建立的模式具备模拟放射性物质在海洋中的运输扩散过程的能力。结果显示: 至 2015 年, ^{137}Cs 表层活度浓度已经扩散至整个中国海域, 活度浓度值在 0.01 Bq/m^3 左右; 事故发生 10 a 后, 研究海域 ^{137}Cs 表层活度浓度趋于均匀, 为 $0.20 \sim 0.60 \text{ Bq/m}^3$ 左右; 20 a 后, ^{137}Cs 在海洋表层的活度浓度要小于 0.15 Bq/m^3 。垂向扩散的结果显示: 事故发生 10 a 后, 黄海海域 ^{137}Cs 垂向分布较为均匀, 东海东部陆架海域活度浓度高于西部海域, 且上层海水中 ^{137}Cs 活度浓度高于底层海水, 南海北部海域 ^{137}Cs 活度浓度高于南部海域, 且略小于黄海和东海; 至 2030 年, 中国近海 ^{137}Cs 的活度浓度的垂向分布趋于均匀, 南海略高于黄海和东海; 日本海 ^{137}Cs 活度浓度主要集中在表层, 最大活度浓度出现在 2016 年, 约为 0.20 Bq/m^3 ; 西北太平洋海域 ^{137}Cs 活度浓度要高于其他 4 个海域; 2030 年以后, 整个海域 ^{137}Cs 活度浓度在水平和垂向分布均趋于均匀, 均小于 0.15 Bq/m^3 。

关键词:福岛核事故; ^{137}Cs ; 放射性物质扩散模式; 西北太平洋

中图分类号: P731.23

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2017)02-0221-13

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2017.02.007

海洋中的放射性物质主要通过大气沉降和直接排入两种方式进入海洋, 在海洋中的存在形式有 3 种: 1) 海水中溶解的放射性物质; 2) 吸附在悬浮物上的放射性物质; 3) 海底沉积物中的放射性物质。以上这 3 种形式存在的放射性物质, 在海洋中随着海水的平流和混合作用相互转化, 对海洋的生态系统产生影响。离子态放射性核素通过水体的垂直运动, 被悬浮物颗粒吸着, 与有机或无机物质凝聚、絮凝, 或通过累积放射性核素的生物的排粪、蜕皮、产卵、铅直移动等途径才能较快地沉降于海洋的底部。沉积物对大多数放射性核素都有很强的吸着能力, 其富集系数因沉积物的组成、粒径、环境条件有较大的差异。海流、波浪和底栖生物还可以使沉积物吸着的放射性核素解吸, 重新进入水体中, 造成二次污染。

自 20 世纪 80 年代开始, 各国学者开始尝试用数值模拟的方法开展海洋中放射性物质扩散的研究工作。1985 年 Evans 利用箱式模型计算了波罗的海的放射性物质的含量^[1]。自此箱式模型被广泛地应用在放射性物质扩散的模拟中, 其主要原理是将研究的区域划分成一个个小的箱子, 不同的箱子之间通过海水的平流和混合作用进行物质交换^[2-6]。Lepicard 等研发的 POSEIDON/RODOS (Real-time On-line Decision Support System) 箱式模型能够同时模拟多源输入的放射性物质, 该模型可以计算出溶质中和沉积物中放射性物质的活度浓度^[2-3]。

收稿日期: 2016-03-11

资助项目: 国家自然科学基金项目——波浪破碎对表层海洋湍流的能量输入(40906017)和福岛核事故泄漏入海 ^{137}Cs 在西北太平洋向西南运输的数值研究(41506035)

作者简介: 赵云霞(1987-), 女, 黑龙江牡丹江人, 博士研究生, 主要从事物理海洋学方面研究. E-mail: zhaoyx@fio.org.cn

*** 通讯作者:** 韩磊(1981-), 男, 山东潍坊人, 副研究员, 博士, 主要从事波浪破碎和海洋环流数值模拟方面研究. E-mail: hanlei@fio.org.cn

(李燕 编辑)

在海洋放射性物质运输模式的发展进程中,Perianez 等做了大量的工作。1996 年 Perianez 和 Abril 在潮汐模式的基础上发展了一个近海海洋放射性物质运输模式,给出了放射性物质在海洋中 3 种存在形式的 4 个扩散方程的概念模型,其中沉积物中放射性物质扩散方程分为两部分,也详细地介绍了他们之间的转换关系,本文的工作也参考了该概念模型^[7]。1998 年 Perianez 在前两年工作的基础上继续发展了可模拟深海放射性物质运输的模式,将其应用于³H,¹³⁷Cs 和^{239,240}Pu 在海洋中的运输研究^[8]。1999 年,Perianez 又对其所建立的模式进行了进一步的完善,模拟了爱尔兰海域的^{239,240}Pu 的分布^[9]。2004 年,Perianez 建立了 3 种动力模型来模拟由法国 La Hague 核废料处理基地释放的¹³⁷Cs 在英吉利海峡处海水中 and 沉积物中的含量,文中也给出了海水中放射性物质几种存在形式之间的交换系数^[10]。此外,Tsumune 等在 OGCM(Ocean General Circulation Model)基础上发展的放射性物质运输模式也取得了较为理想的成果^[11-12]。

当地时间 2011-03-11T14:46,日本宫城县东部海域发生里氏 9.0 级地震,引发了破坏力极大的海啸,海啸最高值达到 40.5 m。海啸越过福岛核电站的堤坝摧毁了核电机组,冷却系统出现故障,进而引发核电站 1-4 号机组爆炸,导致大量放射性物质泄漏。

福岛核事故发生后,各国研究人员开始对此次事故释放的放射性物质在海洋和大气中的扩散展开了一系列的研究。2011-04,Qiao 等针对福岛核事故,利用 CCSM3(Community Climate Atmosphere Model version 3.0)气候预测模式与 MASNUM(Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling)海浪-潮流-环流耦合数值预报系统,在理想条件假设下,对泄漏的放射性物质的运输扩散路径进行了情景模拟和预测^[13]。Kawamura 等根据东京电力公司(Tokyo Electric Power Company, TEPCO)提供的放射性物质泄漏的时间序列,通过示踪物方式模拟了海洋中¹³¹I 和¹³⁷Cs 的扩散过程^[14]。2012 年 Nakano 等建立了分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 的准全球海洋放射性物质运输模式(Long-term Assessment Model of Radionuclides in the oceans, LAM-ER),对此次核事故泄漏的¹³⁷Cs 在海洋中的长期变化进行预测^[15]。何晏春等使用全球版本的迈阿密等密度海洋环流模式(Miami Isopycnic Coordinate Model, MICOM),对此次核事故泄漏的放射性物质在海洋中的传输及扩散进行了数值模拟^[16]。Wang 等使用一个空间分辨率为 $(1/8)^{\circ} \times (1/8)^{\circ}$ 的区域海洋环流模式(Regional Ocean Modeliny System, ROMS),在北太平洋海域对核物质进行了数值模拟^[17]。赵昌等在 2014 年,利用普林斯顿海洋模式(Princeton Ocean Model, POM)建立了一个分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的准全球环流模式,对福岛核事故泄漏进入海洋的¹³⁷Cs 对中国近海的影响进行了模拟与预测^[18]。2015 年,赵昌等在此模式的基础上,对历史上核试验进入海洋中的¹³⁷Cs 对中国近海的影响进行了模拟研究^[19]。

¹³⁷Cs 是核事故释放人工放射性核素中最重要的核素之一,半衰期为 30.17 a,能同时释放出 β 射线和 γ 射线,¹³⁷Cs 通过食物链进入人体之后,聚集在肌肉组织中,危害人体健康。因此,对海水中¹³⁷Cs 比活度的分析在海洋核安全的监管工作中占有很重要的地位。我国水产养殖¹³⁷Cs 的标准为 700 Bq/m³。福岛核事故对世界各国都产生了严重的影响,放射性物质在海洋中的运输和扩散的研究也备受关注。本文考虑了放射性物质在海洋中的 3 种存在方式,基于一个两时间层、原始方程三维海洋环流模式——MASNUM(Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling)海洋环流模式,在西北太平洋海域建立了一个高分辨率的海洋放射性物质运输扩散模式,在此基础上模拟预测福岛核事故对西北太平洋,尤其是对中国海域的影响。

1 模式建立

1.1 海洋环流模式的建立

本文基于国家海洋局第一海洋研究所自主研发的一个两时间层、原始方程三维海洋环流数值模式建立了一个区域海洋环流数值模式^[20]。该环流模式从完整的地球流体力学的控制方程出发,在 Boussinesq 近似和静力学假定下,详细的给出了地形坐标下,雷诺平均的海水运动的控制方程,如下:

连续方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0. \quad (1)$$

动量方程组:

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + \frac{\partial u_1 u_j}{\partial x_j} = f u_2 - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x_1} + \left\{ \frac{\partial}{\partial x_1} \left[2(A_M + K_M + \nu) \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right] + \frac{\partial}{\partial x_2} \left[(A_M + K_M + \nu) \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_3} \left[(K_M + B_V + \nu) \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right) \right] \right\}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} + \frac{\partial u_2 u_j}{\partial x_j} = -f u_1 - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x_2} + \left\{ \frac{\partial}{\partial x_1} \left[(A_M + K_M + \nu) \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_2} \left[2(A_M + K_M + \nu) \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right] + \frac{\partial}{\partial x_3} \left[(K_M + B_V + \nu) \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \right] \right\}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x_3} = -\rho g. \quad (4)$$

温盐方程组:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial u_j T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_1} \left[(A_H + K_H + \kappa_T) \frac{\partial T}{\partial x_1} \right] + \frac{\partial}{\partial x_2} \left[(A_H + K_H + \kappa_T) \frac{\partial T}{\partial x_2} \right] + \frac{\partial}{\partial x_3} \left[(K_H + B_V + \kappa_T) \frac{\partial T}{\partial x_3} \right]; \quad (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial u_j S}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_1} \left[(A_H + K_H + \kappa_S) \frac{\partial S}{\partial x_1} \right] + \frac{\partial}{\partial x_2} \left[(A_H + K_H + \kappa_S) \frac{\partial S}{\partial x_2} \right] + \frac{\partial}{\partial x_3} \left[(K_H + B_V + \kappa_S) \frac{\partial S}{\partial x_3} \right]. \quad (6)$$

式中,变量 u_j 为水平和垂向速度, $j=1,2,3$; T, S 分别为海水的温度和盐度。 ν 是海水的运动黏性系数, κ_T 为海水的分子热扩散系数, κ_S 是海水的盐度扩散系数。 A_M, B_V 和 K_M 分别为水平黏性系数、波生湍流混合系数和垂向湍黏性系数。 A_H 和 K_H 分别为水平尺度耗散系数和垂向湍耗散系数。这些系数通常被验证有以下关系 $A_M \gg K_M \gg \nu$ 和 $A_H \gg K_H \gg \nu$ 。

B_V 是 Qiao 等^[21]2004 年提出的一种将海浪混合作用加入模式的方法,改进了模式的混合方案,波生湍流混合系数 B_V 可表达为海浪波数谱的形式:

$$B_V = \alpha \int_k E(\bar{k}) \exp\{2kz\} d(\bar{k}) \frac{\partial}{\partial z} \left(\int_k \omega^2 E(\bar{k}) \exp\{2kz\} d\bar{k} \right)^{1/2}, \quad (7)$$

式中, $E(\bar{k})$ 表示波浪的方向谱; ω 是角频率; \bar{k} 代表波数; z 表示水深; α 应由实测数据来标定,这里取值为 $\alpha=1$ ^[22]。

MASNUM 环流模式水平采用 Arakawa C 网格,垂向采用 sigma 网格,在数值算法上,内模态和外模态的时间差分算法均采用了两时间层的欧拉前后差分格式(Forward-Backward),三维预报方程中水平扩散项采用显式、垂向扩散项采用隐式,非线性平流项采用显式处理。该环流模式在中国近海潮汐的模拟预测中,对迟角的模拟表现出一定的改善,也能模拟出典型的黄海冷水团的主要特征和变化规律^[20]。

本文环流模式计算区域为 $99^\circ \sim 150^\circ \text{E}$, $0^\circ \sim 50^\circ \text{N}$ (图 1),水平分辨率为 $(1/6)^\circ \times (1/6)^\circ$,垂向分为 16 σ 层,上层和底层采用较高的分辨率。模式的边界条件取自准全球环流模式结果^[20]。地形数据采用政府间海洋委员会和国际水道组织提供的 GEBCO(General Bathymetric Chart of the Oceans) $0.5' \times 0.5'$ 的水深数据插值而来。初始温盐场取自 Levitus 1982 年平均温度和盐度。模式冷启动,初始流速取零。海表驱动场采用 COADS(Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set)提供的 $1^\circ \times 1^\circ$ 的月平均热通量场和风场插值得到。此外加入了潮流开边界条件,还考虑了长江冲淡水的影响及波致混合作用,物质输运模式的开边界条件由全球模式结果插值得到。

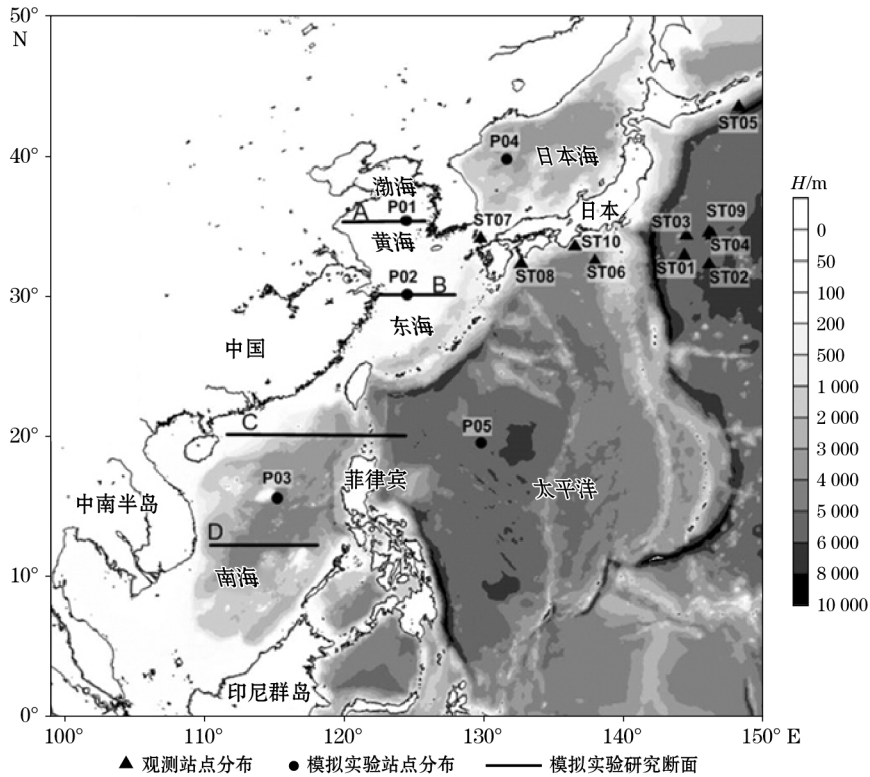


图1 研究区域水深地形图

Fig.1 Topography of the Northwest Pacific Ocean

1.2 放射性物质扩散模式的建立

为模拟放射性物质在海洋中的输运和扩散过程,必须建立一个合理的放射性物质输运扩散模式。1996年 Perianez^[7]提出了放射性物质在海洋中3种存在方式的输运和扩散的概念模型,详细地介绍了放射性物质在溶质中、悬浮物中及大小不同的沉积物中的扩散及相互转化过程。本文在 Perianez 提出的概念模型的基础上,忽略了沉积物中放射性物质对溶质中和悬浮物中放射性物质活度浓度的影响,给出了适合本研究区域合理的放射性物质输运扩散方程。溶质和悬浮物中放射性物质在海洋中的输运扩散方程:

$$\frac{\partial C_d}{\partial t} = -k_1 C_d \frac{H}{H^*} + k_2 C_s m \frac{H}{H^*} + (adv + diff) - \lambda C_d H, \quad (8)$$

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} = -k_1 C_d \frac{H}{m^* H^*} - k_2 C_s m \frac{m H}{m^* H^*} + (adv + diff) - \lambda C_s H. \quad (9)$$

式中, C_d 和 C_s (Bq/m^3) 分别为溶质和悬浮物中的放射性物质活度浓度; H 是水深,星号表示下一时间步长对应的物理量; m 为悬浮物浓度,随着水深的变化而变化,在表层取值为 $m(0) = 0.25 \text{ g}/\text{m}^3$,随深度 z 的变化关系式为 $m(z) = m(0) \times 10^{-0.0005z}$; k_1, k_2 为溶质和悬浮物中放射性物质活度浓度的转化系数,其中 $k_1 =$

$x_1 S_s, x_1 = 2.10 \times 10^{-8} \text{ m}/\text{s}$ 为表层交换速度,由实验室数据得到^[10]; $S_s = \frac{m}{\rho} \frac{4\pi R^2}{3\pi R^3} = \frac{3m}{\rho R}$ 是单位体积的悬

浮物颗粒与溶质之间的表层交换,其中悬浮物密度 $\rho = 2600 \text{ kg}/\text{m}^3$,悬浮物半径 $R = 1.5 \times 10^{-5} \text{ m}$,均为常数。 $k_2 = 1.16 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,由实验室数据得到^[10];平流项 adv 和扩散项 $diff$ 可以写成如下形式:

$$adv = u_i \frac{\partial C_d}{\partial x_i}, \quad (10)$$

$$\text{diff} = \frac{\partial}{\partial x_1} \left(A_H + \frac{\partial C_d}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(A_H + \frac{\partial C_d}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(K_H + \frac{\partial C_d}{\partial x_3} \right), \quad (11)$$

λC_d 为长期变化项,衰变系数 $\lambda = \frac{\ln 2}{T}$,对于放射性核素 ^{137}Cs 来讲,其半衰期 $T = 30.17 \text{ a}$ 。本文模拟的日本福岛核事故 ^{137}Cs 的输运扩散的初始场来自 TEPCO 发布的 2011-03-11—04-06 日本福岛第一核电站释放到海洋和大气中的 ^{137}Cs 的含量。

2 环流模式结果验证

为了验证环流模式对西北太平洋的模拟能力,本文对模拟的海表温度场和流场与观测资料进行了验证。

2.1 海表温度场

海表温度场的验证,我们选取了美国国家海洋大气管理局(NOAA)的气候态资料 WOA13(World Ocean Atlas 2013)气候态温度场作为参考。图 2 给出了模式积分 20 a 气候态海表温度场(a:2月,c:8月)和 WOA13 资料(b:2月,d:8月)气候态海表温度观测资料的分布。从图中可以看出,模式积分 20 a 的 SST 可以很好地反映出观测的 SST 的一些基本的特征。2 月份,研究区域的 SST 整体呈现由南至北递减趋势,且梯度较为显著,赤道太平洋海区温度在 28°C 以上,中国南海海域 SST 也较高,一般为 $20\sim 28^\circ\text{C}$,渤、黄、东海的 SST 为 $0\sim 20^\circ\text{C}$ 。SST 的模式结果分布也很好地反映了黄海暖流、对马暖流及黑潮的配置关系。黑潮及暖流的流经海域,其 SST 要明显高于邻近海域,东海黑潮水温高达 $20\sim 24^\circ\text{C}$,流经至日本沿岸海域,SST 减小至 $16\sim 22^\circ\text{C}$ 。冬季,泰国湾口附近较观测结果偏低, 40°N 以北海域结果偏高。8 月份,是北半球夏季,也是全年水温最高的月份。 35°N 以南大部分海域,SST 在 $26\sim 30^\circ\text{C}$,个别海域已经超过 30°C 。日本沿岸海域 SST 在 26°C 左右, 35°N 以北海域,SST 随纬度增加呈递减分布。夏季, 45°N 以北海域以及 20°N 太平洋海域模拟的 SST 较观测结果偏高。总体来看,MASNUM 海洋环流模式模拟的 SST 结果在一定程度上能够很好地再现研究海域气候态 SST 的分布特征。

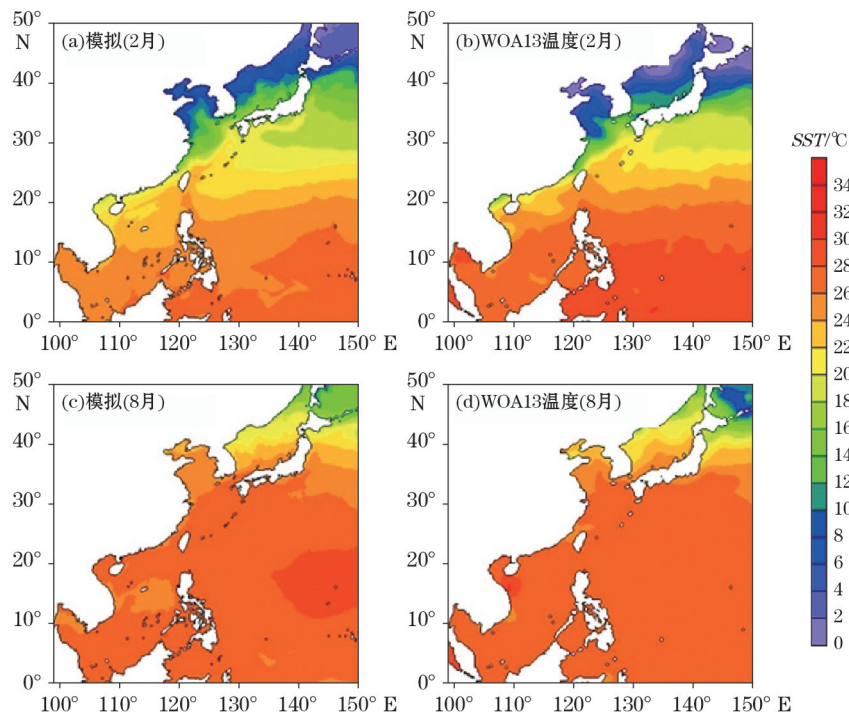


图 2 模拟的海表面温度场与 WOA13 气候态温度场的比较

Fig.2 Comparison between the Model simulated and WOA13 Monthly climatology SST

2.2 表层流场

图 3 给出了模式模拟的研究区域的 20 a 平均的表层流场(a:2 月,b:8 月)与 OSCAR(Ocean Surface Current Analyses-Real time,c:2 月,d:8 月)和 SODA(e:2 月,f:8 月)气候态平均的表层流场分布。通过比较可以看出,环流模式模拟的表层流场可以很好地描述北赤道流、黑潮、黑潮延伸体、棉兰老流和北赤道逆流的特征。冬季,北赤道流在太平洋西边界发生分岔,表层分岔位置在 $12^{\circ}30'N$ 左右,其北向分支形成黑潮,在 $30^{\circ}N$ 左右转为东向流动的黑潮延伸体;其南向分支形成棉兰老流,在 $5^{\circ}N$ 左右转为东向流动的北赤道逆流。夏季,北赤道流表层分岔位置向北移动,在 $14^{\circ}N$ 左右。渤、黄、东和南海的表层流场受东北季风和西南季风的影响,存在明显的季节变化特征。这也进一步表明 MASNUM 海洋环流模式模拟的西北太平洋的流场在一定程度上能够很好地再现西北太平洋流场的气候态变化特征。

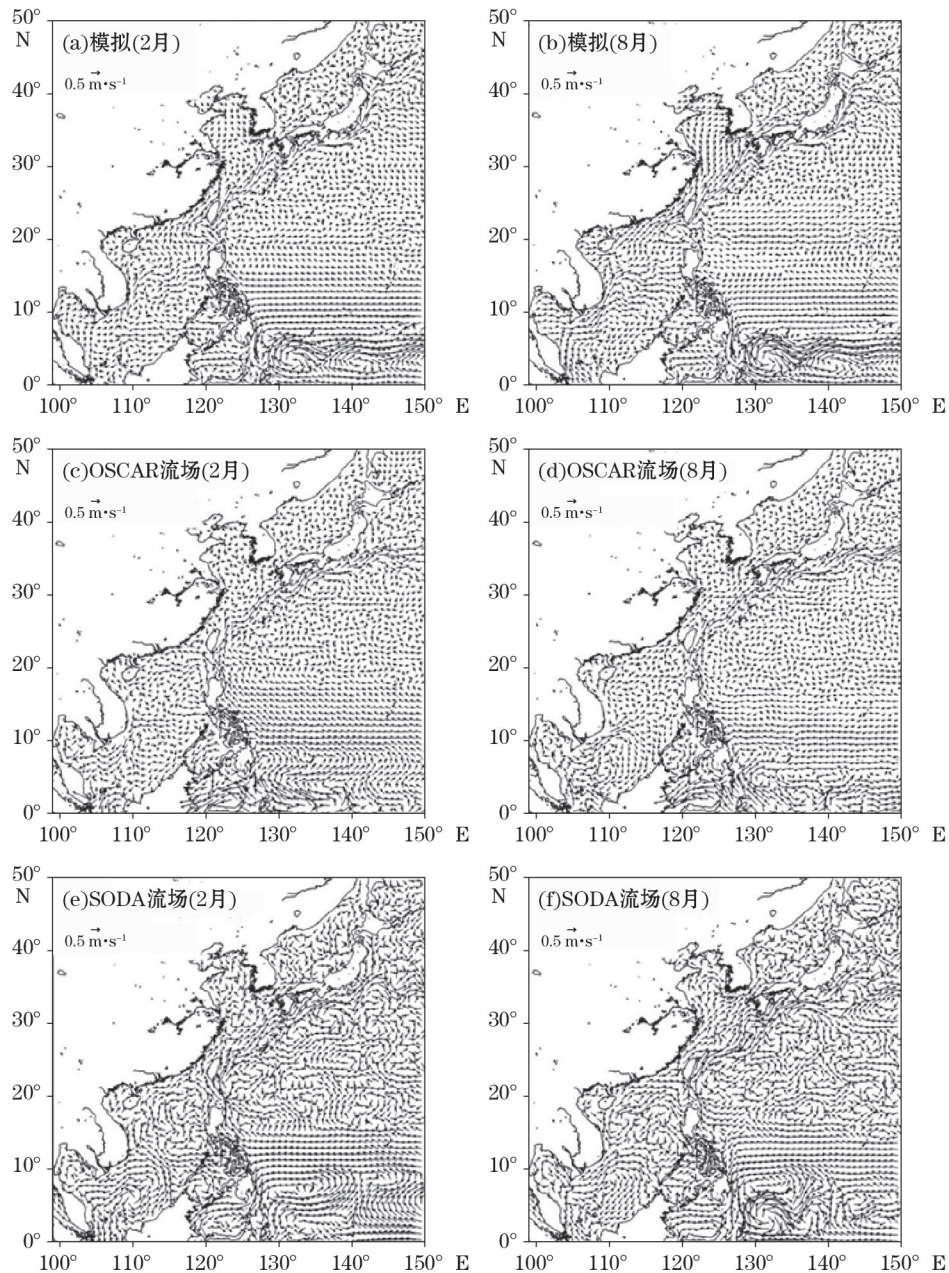


图 3 模式模拟与 OSCAR,SODA 气候态表层流场分布

Fig.3 Climatological monthly surface current from the model, OSCAR and SODA

3 放射性物质¹³⁷Cs的模拟结果

MASNUM 海洋环流模式能够模拟研究海域的水动力特征,在此基础上,模拟并预测了 2011 年日本福岛核事故中泄漏的¹³⁷Cs 在海洋中的运输扩散过程。

Aoyama 等给出了 2011-11—2012-03 日本核事故后在日本周边及太平洋海域的¹³⁷Cs 的表层活度浓度的观测数据^[23]。表 1 选取了本文研究区域范围内的 10 个观测站点(ST01~ST10)的¹³⁷Cs 的表层活度浓度信息,并以此来验证模式模拟的准确性,10 个观测站点的位置在图 1 中已给出(黑色三角形)。二战以来,各国的核试验、核废料及核武器等排入到海洋中的放射性核素仍有残留,表 1 中给出了赵昌等给出的这 10 个站点至 2011 年福岛核事故之前的¹³⁷Cs 的比活度信息^[19]。通过比较,10 个站点的模拟结果与观测结果相对误差都在 10% 以内。相关分析也显示实验结果与观测结果较为一致,二者的相关系数达到 98%。总之,通过与观测数据的比较分析,验证了在 MASNUM 环流模式基础上运行的放射性物质运输扩散模式在模拟¹³⁷Cs 在海洋中的运输扩散过程是可靠的。

表 1 2011-11—2012-03¹³⁷Cs 的观测和模拟信息

Table 1 Comparison between the observed and the model simulated ¹³⁷Cs concentration variations

观测站点	纬度	经度	观测日期	¹³⁷ Cs 观测 活度浓度 ^[23] /Bq·m ⁻³	¹³⁷ Cs 残留 活度浓度 ^[19] /Bq·m ⁻³	¹³⁷ Cs 模式模拟 活度浓度 /Bq·m ⁻³	相对误差(观测— 模拟—残留)/观测 /×100%	
ST01	VOS11-589	33°07'N	144°28'E	2011-11-08	9.6±0.6	2.00	6.87	7%
ST02	VOS11-619	32°31'N	146°02'E	2011-11-08	2.1±0.2	1.20	1.03	6%
ST03	VOS11-668	34°44'N	144°35'E	2011-11-18	2.3±0.2	1.10	1.30	4%
ST04	VOS11-670	34°45'N	146°35'E	2011-11-18	2.0±0.2	1.10	0.82	4%
ST05	VOS11-640	43°38'N	148°32'E	2011-12-13	1.4±0.2	1.00	0.50	7%
ST06	VOS11-646	32°20'N	138°02'E	2011-12-17	1.4±0.2	1.30	0.16	4%
ST07	VOS11-543	34°27'N	130°05'E	2012-01-21	1.4±0.1	1.35	0.17	8%
ST08	VOS11-545	32°32'N	132°59'E	2012-01-22	1.3±0.1	1.30	0.01	1%
ST09	VOS12-710	34°53'N	146°31'E	2012-01-22	1.9±0.2	1.10	0.85	3%
ST10	VOS11-547	33°34'N	136°27'E	2012-01-23	1.4±0.2	1.25	0.08	5%

3.1 放射性物质¹³⁷Cs的水平扩散

为了研究放射性物质在西北太平洋海域的长期运输扩散路径,图 4 给出了福岛核事故泄漏的核物质¹³⁷Cs 在 2011-06—2030-06 中在海洋表层的分布情况。从图中可以看出,核事故发生 3 个月后,由于事故发生在黑潮延伸体流域,使得放射性物质迅速向东扩散,日本东部海域表层¹³⁷Cs 的活度浓度最高达到 300 Bq/m³ 以上;1 a 后,日本附近海域¹³⁷Cs 表层活度浓度下降两个量级,在 1~10 Bq/m³;自 2013 年开始,核物质蔓延至中国海域,¹³⁷Cs 表层活度浓度小于 0.005 Bq/m³;2015 年的水平分布显示,¹³⁷Cs 已经扩散至整个中国海域,表层活度浓度在 0.01 Bq/m³ 以上。东海和台湾以东海域的¹³⁷Cs 表层活度浓度在 0.10 Bq/m³ 以上;至 2020-06,即福岛核事故 10 a 后,研究区域的¹³⁷Cs 表层活度浓度趋于均匀,在 0.20~0.60 Bq/m³,这种状态将持续 5~6 a,到 2026 年之后,¹³⁷Cs 表层活度浓度将减小至 0.20 Bq/m³ 以下;事故发生 20 a 后,经过进一步的扩散和稀释,¹³⁷Cs 在海洋表层的活度浓度小于 0.15 Bq/m³。

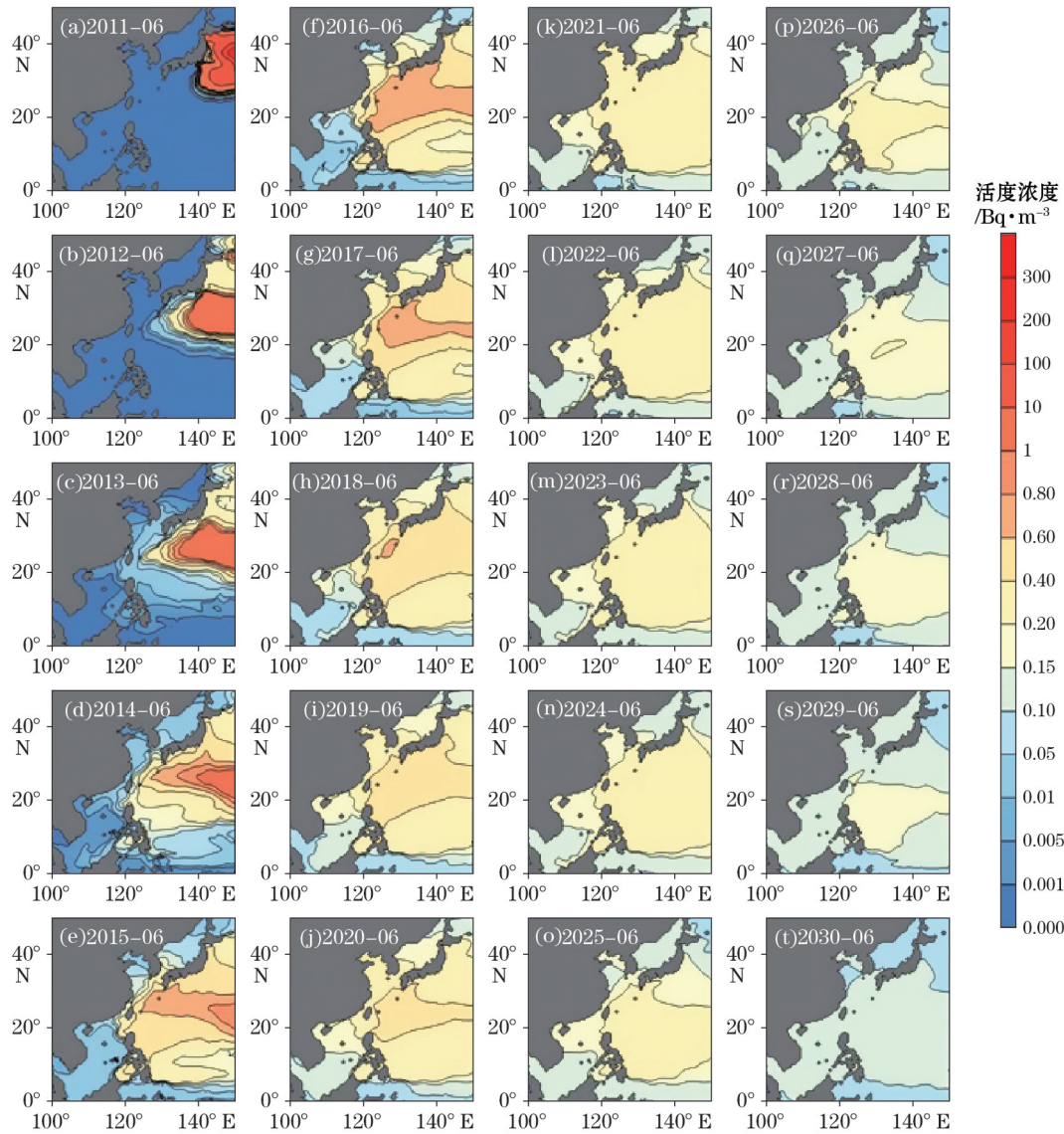


图4 模式模拟的 20 a ^{137}Cs 表层活度浓度分布

Fig.4 Simulated distribution of surface ^{137}Cs concentration in 20 years

3.2 放射性物质 ^{137}Cs 的垂向扩散

为了进一步了解福岛核事故释放的 ^{137}Cs 在研究海域的输运扩散过程,本文在研究区域范围内,选取5个代表性的站点P01~P05和4个断面A~D(图1)来研究 ^{137}Cs 在各个海域中的垂向扩散,表2给出了选取的5个站点的信息。

图5给出了选取的5个站点的 ^{137}Cs 20 a的垂向分布,图6和图7分别给出了2020-06和2030-06,4个断面的 ^{137}Cs 的垂向分布。从图中可以看出:黄海代表站点P01与东海代表站点P02的垂向分布大致相同,由于海域水深较浅, ^{137}Cs 的活度浓度上下趋于一致;2016年,东海海域 ^{137}Cs 活度浓度在 $0.20\text{ Bq}/\text{m}^3$ 左右,黄海海域 ^{137}Cs 活度浓度在 $0.10\text{ Bq}/\text{m}^3$ 左右;东海海域最大活度浓度在 $0.28\text{ Bq}/\text{m}^3$ 左右,出现在2017—2020年间,黄海海域最大活度浓度在 $0.22\text{ Bq}/\text{m}^3$ 左右,出现在2019年;2020-06黄海A断面的垂向混合较为均匀, ^{137}Cs 活度浓度上下层趋于一致,约为 $0.22\text{ Bq}/\text{m}^3$;东海靠近陆架区域的 ^{137}Cs 活度浓度高于西海岸,活度

浓度最高可达到 0.5 Bq/m³,且上层海水中¹³⁷Cs活度浓度略高于下层海水。到 2030 年,黄海和东海中的¹³⁷Cs活度浓度均小于 0.14 Bq/m³,海域东部活度浓度高于西部。

表 2 选取的 5 个代表站点的信息

Table 2 5 selected representative stations

模拟站点	纬度	经度	实际水深 /m	最大活度浓度出现水深/m	最大活度浓度出现时间	最大活度浓度 /Bq·m ⁻³
P01-YS	36°N	124°E	78	0~30	2019	0.22
P02-ECS	30°N	124°E	59	0~40	2017	0.28
P03-SCS	15°N	115°E	4 064	450~700	2022	0.18
P04-JS	40°N	132°E	2 932	0~120	2016	0.20
P05-NPO	20°N	130°E	5 895	100~300	2016	1.20

注:YS为黄海;ES为东海;SCS为南海;JS为日本海;NPO为西北太平洋

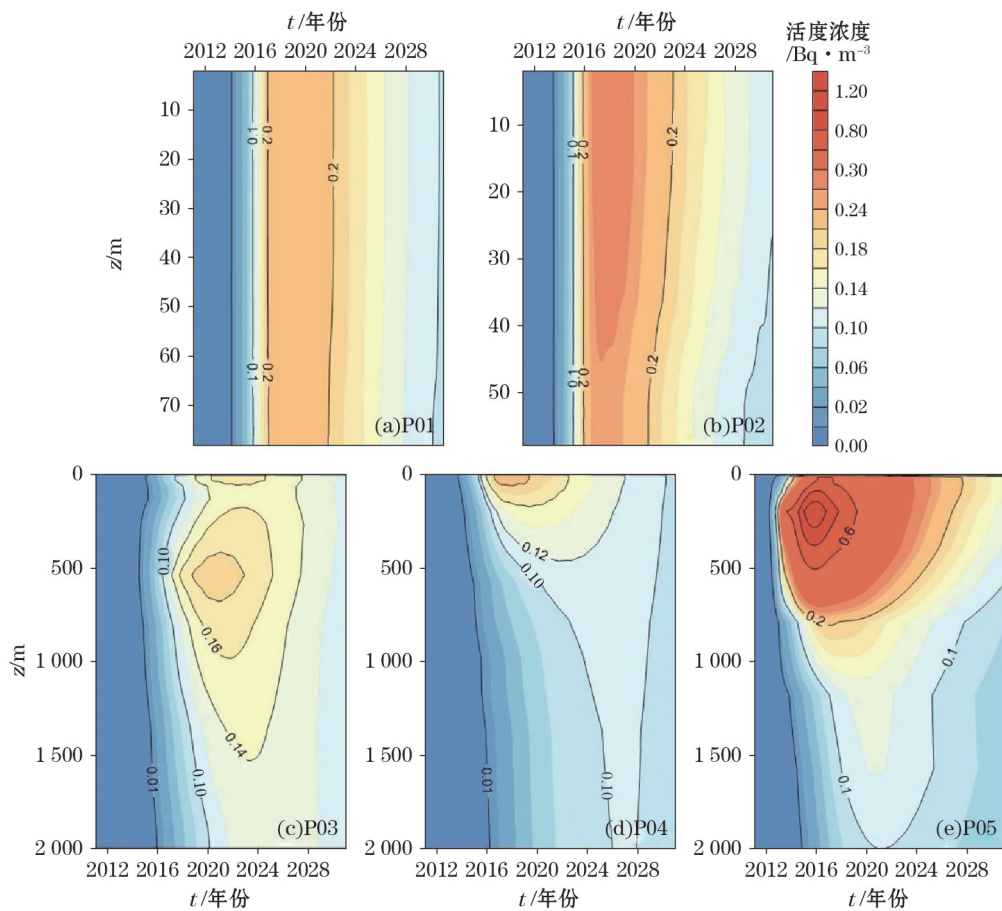


图 5 选取的 5 个站点处¹³⁷Cs活度浓度的 20 a 垂向分布

Fig.5 Vertical distribution of ¹³⁷Cs concentration at the five selected representative stations in 20 years

2020 年,南海海域¹³⁷Cs活度浓度总体小于黄海和东海,最大活度浓度大约为 0.20 Bq/m³,且南海北部的¹³⁷Cs活度浓度要高于南海南部,垂向分布呈现上层活度浓度高于底层;南海北部海域,中层海水中¹³⁷Cs活度浓度要高于表层和底层海水;P03 实验站点的时间分布显示,在 2022 年南海中部¹³⁷Cs活度浓度出现最大值,约为 0.18 Bq/m³,且位于 500 m 层附近;接下来的 10 a,¹³⁷Cs活度浓度又呈递减趋势,至 2030 年,南海整个海域中¹³⁷Cs活度浓度趋于均匀,活度浓度在 0.1 Bq/m³左右。

日本海海域¹³⁷Cs活度浓度主要集中在表层,最大活度浓度出现在 2016 年,大约为 0.20 Bq/m³;西北太

平洋海域, ^{137}Cs 活度浓度要高于其他四个海域, 最大活度浓度大约在 1.20 Bq/m^3 , 出现在 2016 年, 位于 $100 \sim 300 \text{ m}$ 层; 核事故 20 a 后, 整个研究海域, ^{137}Cs 活度浓度在垂向分布上趋于均匀, 大部分海域 ^{137}Cs 活度浓度小于 0.12 Bq/m^3 , 西北太平洋海域上 600 m 层 ^{137}Cs 活度浓度略高, 但也不超过 0.14 Bq/m^3 。

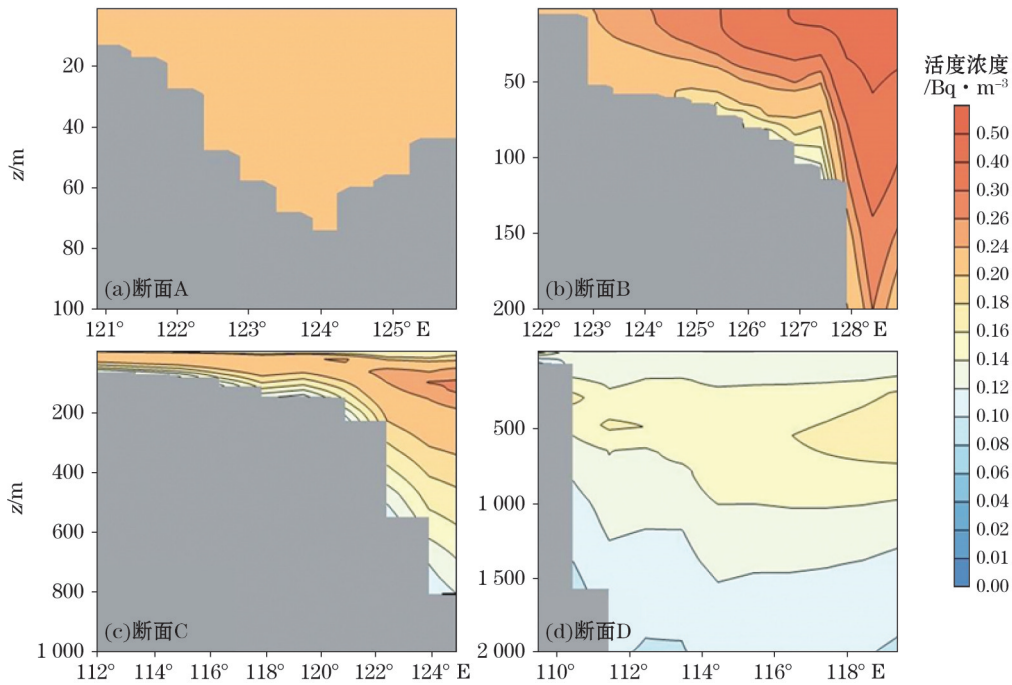


图 6 2020-06 选取的 4 个断面的 ^{137}Cs 活度浓度的垂向分布

Fig.6 Vertical distribution of ^{137}Cs concentration at the four selected representative sections in June 2020

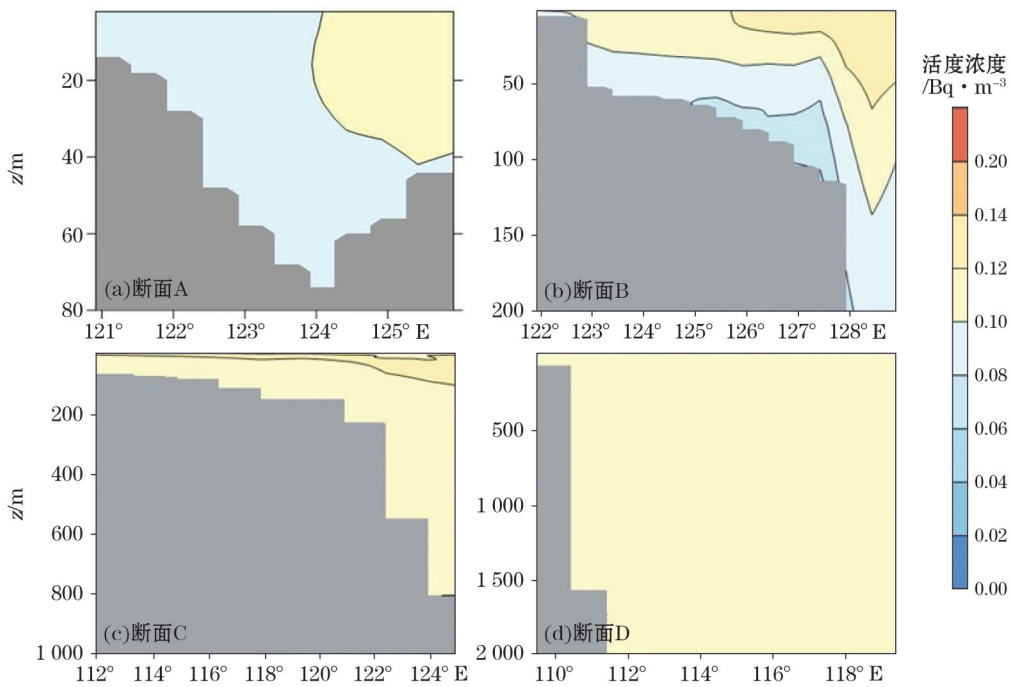


图 7 2030-06 选取的 4 个断面的 ^{137}Cs 活度浓度的垂向分布

Fig.7 Vertical distribution of ^{137}Cs concentration at the four selected representative sections in June 2030

4 结 论

本文基于 MASNUM 海洋环流模式,针对 2011-03 日本福岛核事故,建立了西北太平洋的区域放射性物质的输运扩散模式,采用 TEPCO 给出的核事故释放¹³⁷Cs 的含量作为初始条件,对放射性¹³⁷Cs 在 20 a 间的输运过程及其在研究海域的垂向扩散进行了研究。根据与观测资料的比较,该模式具备模拟放射性物质在海洋中的输运扩散过程的能力,主要得到以下结论:

1)¹³⁷Cs 的水平输运显示:至 2015 年,¹³⁷Cs 表层活度浓度已经扩散至整个中国海域,活度浓度值在 0.01 Bq/m³左右;事故发生 10 a 后,研究海域¹³⁷Cs 表层活度浓度趋于均匀,在 0.20~0.60 Bq/m³;20 a 后,经过进一步的扩散和稀释¹³⁷Cs 在海洋表层的活度浓度都要小于 0.15 Bq/m³。

2)¹³⁷Cs 的垂向扩散显示:至 2020 年黄海的垂向混合较为均匀,¹³⁷Cs 活度浓度上下层趋于一致;东海靠近陆架区域的¹³⁷Cs 活度浓度高于西海岸,且上层海水中¹³⁷Cs 活度浓度略高于下层海水;南海海域¹³⁷Cs 活度浓度总体小于黄海和东海,且南海北部的¹³⁷Cs 活度浓度要高于南海南部。至 2030 年,黄海和东海中的¹³⁷Cs 活度浓度均小于南海,且海域东部活度浓度略高于西部。日本海¹³⁷Cs 活度浓度主要集中在表层,最大活度浓度出现在 2016 年。西北太平洋海域,¹³⁷Cs 活度浓度要高于其他 4 个海域。

3)核事故 20 a 后,整个研究海域,¹³⁷Cs 活度浓度在水平和垂向分布均趋于均匀,大部分海域¹³⁷Cs 活度浓度均小于 0.15 Bq/m³。

参考文献(References):

- [1] EVANS S. A box model for calculation of collective dose commitment from radioactive waterborne releases to the Baltic Sea[J].*Journal of Environmental Radioactivity*, 1985, 2(1):41-57.
- [2] LEPICARD S, RAFFESTIN D, RANCILLAC F. Poseidon: a dispersion computer code for assessing radiological impacts in a European sea water environment[J].*Radiation Protection Dosimetry*, 1998, 75:79-83.
- [3] LEPICARD S, HELING R, MADERICH V. POSEIDON/RODOS models for radiological 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(1-2):153-161.
- [4] NIELSEN S. A comparison between predicted and observed levels of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in the Baltic Sea[J].*Radioprotection*, 1997, 32 (C2): 387-394.
- [5] NIELSEN S, BENGTON P, BOJANOWSKY R, et al. The radiological exposure of man from radioactivity in the Baltic Sea[J].*The Science of the Total Environment*, 1999, 237/238(4):133-141.
- [6] IOSJPE M, BROWN J, STRAND P. Modified approach to modelling radiological consequences from releases into the marine environment [J].*Journal of Environmental Radioactivity*, 2002, 60(1-2):91-103.
- [7] PERIANEZ R, ABRIL J. Modelling the dispersion of non-conservative radionuclides in tidal waters-part 1: conceptual and mathematical model[J].*Journal of Environmental Radioactivity*, 1996, 31(2): 127-141.
- [8] PERIANEZ R. Modelling the distribution of radionuclides in deep ocean water columns. Application to ³H, ¹³⁷Cs and ^{239,240}Pu[J].*Journal of Environmental Radioactivity*, 1998, 38(2):173-194.
- [9] PERIANEZ R. Three-dimensional modelling of the tidal dispersion of non-conservative radionuclides in the marine environment. Application to ^{239,240}Pu dispersion in the eastern Irish Sea[J].*Journal of Marine Systems*, 1999, 22: 37-51.
- [10] PERIANEZ R. Testing the behavior of different kinetic models for uptake/release of radionuclides between water and sediments when implemented in a marine dispersion model[J].*Journal of Environmental Radioactivity*, 2004, 71: 243-259.
- [11] TSUMUNE D, AOYAMA M, HIROSE K. Behavior of ¹³⁷Cs concentrations in the North Pacific in an ocean general circulation model [J].*Journal of Geophysical Research*, 2003a, 108(C8): 3262.
- [12] TSUMUNE D, AOYAMA M, HIROSE K. Numerical simulation of ¹³⁷Cs and ^{239,240}Pu concentrations by an ocean general circulation model[J].*Journal of Environmental Radioactivity*, 2003b, 69: 61-84.
- [13] QIAO F L, WANG G S, ZHAO W, et al. Predicting the spread of nuclear radiation from the damaged Fukushima Nuclear Power Plant

- [J].Chinese Science Bulletin, 2011, 56(2):1890-1896.
- [14] KAWAMURA H, KOBAYASHI T, FURUNO A, et al. Preliminary numerical experiments on oceanic dispersion of ^{131}I and ^{137}Cs discharged into the ocean because of the Fukushima Daiichi nuclear power plant disaster[J].Journal of Nuclear Science and Technology, 2011, 48(11): 1349-1356.
- [15] NAKANO M, POVINEC 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.
- [16] HE Y C, GAO Y Q, WANG H J, et al. Transport of nuclear leakage from Fukushima nuclear power plant in the North Pacific[J].Haiyang Xuebao, 2012, 34(4):12-20. 何晏春, 郜永祺, 王会军, 等. 2011年3月日本福岛核电站核泄漏在海洋中的传输[J].海洋学报, 2012, 34(4):12-20.
- [17] WANG H, WANG Z Y, ZHU X M, et al. Numerical study and prediction of nuclear contaminant transport from Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant in the North Pacific Ocean[J].Chinese Science Bulletin, 2012, 57(26):3518-3524.
- [18] ZHAO C, QIAO F L, WANG G S, et al. Simulation and prediction of ^{137}Cs from the Fukushima accident in the China Seas[J].Chinese Science Bulletin, 2014, 59(34): 3416-3423. 赵昌, 乔方利, 王关锁, 等. 福岛核事故泄漏进入海洋的 ^{137}Cs 对中国近海影响的模拟与预测[J].科学通报, 2014, 59(34):3416-3423.
- [19] ZHAO C, QIAO F L, WANG G S, et al. Simulation of the influence of ^{137}Cs from nuclear experiments on China seas[J].Haiyang Xuebao, 2015, 37(3):15-24. 赵昌, 乔方利, 王关锁, 等. 历次核试验进入海洋的 ^{137}Cs 对中国近海影响的模拟研究[J].海洋学报, 2015, 37(3):15-24.
- [20] HAN L. A two-time-level split-explicit ocean circulation model (MASNUM) and its validation[J].Acta Oceanologica Sinica, 2014, 33(11): 11-35.
- [21] QIAO F L, YUAN Y L, YANG Y Z, et al. Wave-induced mixing in the upper ocean: distribution and application to a global ocean circulation model[J].Geophysical Research Letters, 2004, 31(11): 293-317.
- [22] QIAO F L, YUAN Y L, EZER T, et al. A three-dimensional surface wave-ocean circulation coupled model and its initial testing[J].Ocean Dynamics, 2010, 60(5):1339-1355.
- [23] AOYAMA M, UEMATSU M, TSUMUNE D, et al. Surface pathway of radioactive plume of TEPCO Fukushima NPP1 released ^{134}Cs and ^{137}Cs [J].Biogeosciences Discussions, 2013, 10: 265-283.

Numerical Study and Prediction of ^{137}Cs Transport From the Fukushima Nuclear Accident in the Northwest Pacific Ocean

ZHAO Yun-xia^{1,2,3}, HAN Lei^{2,3}, QU Da-peng^{2,3}, ZHAO Chang^{2,3}, ZHUANG Zhan-peng^{1,2,3},
YUAN Ye-li^{1,2,3}

(1. *College of Oceanic and Atmospheric Science, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;*

2. *The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China;*

3. *Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China)*

Abstract: On March 11, 2011, significant amounts of radioactive contaminants were leaking into the air and oceans causing by the Fukushima Daiichi nuclear power plant (FD-NPP) accident. Based on a two-time-level, three-dimensional numerical ocean circulation model (named MASNUM), we established a high resolution Northwest Pacific Ocean radionuclides transport model to simulate and predict the transport of the leaking radioactive isotope ^{137}Cs resulting from the nuclear accident in 20 years. According to the comparison with the observation data, the established radionuclides transport model was validated effective and reliable. The results show: the surface concentration of ^{137}Cs had spread to the whole China seas in 2015, with the concentration about 0.01 Bq/m^3 ; the surface concentration tend to be evenly distributed in 10 years, at around $0.20\sim 0.60\text{ Bq/m}^3$; till 2030, the concentration in surface ocean is less than 0.15 Bq/m^3 . The vertical diffusion results show: in 2020, the concentration of ^{137}Cs in the Yellow Sea are roughly the same in the vertical distribution; the concentration of ^{137}Cs is larger in the east of the East China Sea than the west area, where the concentration in the surface layers is larger than the bottom layers; the concentration in the northern South China Sea is larger than that in the southern seas, and a slightly smaller than the Yellow Sea and the East China Sea; the ^{137}Cs concentration vertical distribution becomes homogeneous in the China seas in 2030; The high concentration in the Japan Sea will concentrate in the surface layer, with a maximum value of 0.20 Bq/m^3 in 2016. The ^{137}Cs concentration in the Northwest Pacific Ocean with a maximum concentration is larger than the other four seas. The ^{137}Cs concentration of the entire area will be affected to be consistent in horizontal and vertical distribution in 20 years, with the low concentration less than 0.15 Bq/m^3 .

Key words: Fukushima nuclear accident; ^{137}Cs ; radionuclides transport model; the Northwest Pacific Ocean

Received: March 11, 2016