

日本福岛放射性污染物在北太平洋海水中的输运模拟与预测

王辉, 王兆毅*, 朱学明, 王大奎, 刘桂梅

国家海洋环境预报中心, 国家海洋局海洋灾害预报技术研究重点实验室, 北京 100081

* 联系人, E-mail: wangzy@nmefc.gov.cn

2012-01-12 收稿, 2012-03-23 接受

国家重点基础研究发展计划(2011CB403600)和自然科学基金(40531006, 41076011, 41106024)资助

摘要 针对 2011 年 3 月 11 日地震和海啸引发的日本福岛核电站放射性污染物泄漏事件, 利用 ROMS 海洋模式对北太平洋海洋环流进行了模拟, 并在该海洋环流数值模拟结果基础上, 对核泄漏物质在海洋中的输运过程进行了 10 年的中长期模拟和预测. 模拟结果显示: 放射性污染物通过北太平洋低位涡水的输运通道到达我国近海的时间约为 12 年; 表层放射性污染物随着海流最远输运到 140°W 后便分为南北两支, 南支随着赤道流系向西输运, 可以影响到菲律宾以东洋面, 北支到达北美西海岸后随沿岸流向南北输运, 北向输运可以影响到白令海峡; 200 m 层的放射性污染物进入海洋后的输运分为 3 个部分: 一部分沿深层海水流动向西南输运; 一部分随低位涡水团输运影响台湾以东海区; 还有一部分随黑潮延伸体向东输运, 并分为两支, 其中一支会输运到北美西海岸, 另外一支向南影响到夏威夷岛周围海域. 最后, 结合污染物漂移扩散模型估算了放射性污染物在海洋中的浓度扩散趋势: 放射性同位素 ^{137}Cs 的浓度高值区逐渐向东移动, 2 年后可达太平洋海盆中部, 8 年后可达北美西海岸, 虽然影响范围不断扩大, 但其极值浓度在不断降低.

关键词

环流模型
核泄漏
输运
预测
 ^{137}Cs

北京时间 2011 年 3 月 11 日 13 时 46 分, 距日本本州岛仙台港以东约 129 km 的海底发生 9.0 级地震 (38.3°N , 142.4°E), 随后引发的高达 10 m 的海啸袭击了日本东部沿海地区(USGS, 2011: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2011/usc0001xgp/>). 受此次地震及其引发的海啸影响, 日本福岛核电站 (37.42°N , 141.03°E) 遭受重创, 6 个反应堆中的 4 个发生严重故障, 从而引起大量放射性物质泄漏到大气和海洋当中^[1,2]. 由日本教育、文化、体育、科技部门 (MEXT, 2011: <http://radioactivity.mext.go.jp/en/1270/2011/06/13047970616e.pdf>) 和其他组织^[1,3] 发布的观测数据显示: 福岛核电站放射性物质泄漏导致日本福岛县及其周围地区的放射性非常强. 在整个北半球的很多大气观测站中都监测到受此事故影响放射

性污染物浓度不同程度地升高现象^[4,5].

日本福岛核泄漏事故导致的放射性污染物在北半球随着大气和海洋的运动而运移和扩散, 其影响的范围以及未来的发展变化趋势是亟待解决的科学问题. 放射性污染物的扩散通常存在以下三类通道: 大气中随气流的极快速通道、海洋中随海流的慢速通道和包括人类活动在内的生物通道^[6]. 大气通道输运速度比较快, 在 3~4 个月内浓度就会迅速减少并沉降到海洋和陆地上^[7]. 海洋通道的输运速度相对较慢, 需要数年甚至数十年才能看出明显的长期输运效果. 生物通道的输运作用较微弱, 只有在研究局部区域的影响时才需要考虑.

针对此次核泄漏事件, 很多学者对大气气溶胶中放射性同位素的扩散和沉降进行了观测与模拟,

估计了 ^{131}I , ^{133}Xe 及 ^{137}Cs 等放射性同位素的沉降率^[7-9]. 研究表明, 大约 87% 的 ^{131}I 和 78% 的 ^{137}Cs 沉降到了海洋当中^[9], 因此在对放射性污染物在中长期的影响范围的研究中, 海洋通道的输运作用就显得非常重要.

鉴于海洋调查设备和技术上的限制, 在广阔的大洋进行大范围、长时间序列的观测十分困难. 因此, 在实际观测资料较少、无法满足研究需求的情况下, 用数值模式进行模拟计算便成为既经济又有效的研究手段. 为了较好地模拟放射性污染物随海流的输运, 拥有一个好的环流模式是必不可少的. 很多学者对太平洋环流开展过相关研究工作^[10-13], 对太平洋的环流模拟研究有了较深入的认识. 针对此次日本福岛核泄漏事故, 诸多学者对放射性污染物在海洋中的输运扩散进行了研究, 如日本海洋地球科学技术处(JAMSTEC, 2011: <http://www.mext.go.jp/english/incident/1305758.htm>)和日本国际原子能机构(JAEA, 2011: <http://www.mext.go.jp/english/incident/1305758.htm>), 以及乔方利等人^[6]和 Tsumune 等人^[14]进行了短期的数值模拟, 但是针对中长期输运扩散方面的研究仍较为匮乏.

本文基于 COADS (comprehensive ocean-atmosphere data set, $0.5^\circ \times 0.5^\circ$) 气象强迫场和美国海军的 GDEM(generalized digital environment model, $0.25^\circ \times 0.25^\circ$) 海洋温盐背景场, 利用 ROMS(regional ocean model system) 海洋环流数值模式对北太平洋温盐和环流场进行模拟, 在得到令人满意的模拟结果的基础之上对核泄漏物质在海洋表层和内部的输运过程进行中长期的模拟和预测, 并结合污染物扩散模型, 估算了放射性污染物在海洋中的浓度扩散趋势.

1 数值模式和实验设计

本文采用 ROMS 海洋数值模式, 该模式是近年来新发展起来的一个三维、自由海面 and 基于地形跟随坐标的非线性斜压模式^[15]. 模式模拟区域为赤道及北太平洋海域, 纬度范围为 $15^\circ\text{S} \sim 61^\circ\text{N}$, 经度范围为 $98^\circ\text{E} \sim 70^\circ\text{W}$. 由于模式水平分辨率对大洋环流模式模拟性能有显著的影响^[16], 粗分辨率的海洋模式只能抓住海洋的一些基本观测特征^[17]. 为了提高模式的模拟性能, 我们采用了高分辨率的模式网格, 水平网格分辨率为 $1/8^\circ$, 其中纬向网格 1545, 经向网格 633; 垂

向采用沿地形的垂直伸展坐标系, 共分为 22 层.

模式地形数据由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)($0.5^\circ \times 0.5^\circ$) 的全球海洋资料中提取, 并对地形进行适当的平滑, 以减小海底海山等对模式稳定性的影响. 模式由 COADS 资料提供的表面风场、热通量、淡水通量等提供大气强迫; 温、盐初始场都由 SODA(simple ocean data assimilation) 历年月平均资料提供, 温盐背景场采用的是 GDEM 月平均资料. 考虑到边界条件对北太平洋尺度环流模拟的影响^[18], 模式南、北、西边界设为开边界, 其水位和流场数据都由 SODA 资料提供. 模式内模时间步长 1200 s, 外模时间步长 40 s, 模式总共积分 21 a, 待模式运行稳定后, 自第 11 年开始考虑污染物的质点追踪.

2 模拟结果验证

为了评估模式对北太平洋气候态的模拟能力, 本文分析了海表面温度(sea surface temperature, SST)、海表面高度(sea surface height, SSH)及流场等重要物理量的模拟结果. 考虑海洋的热惯性使海洋状况的变化有滞后效应, 我们将模式模拟的月平均 2 和 8 月的模拟结果与 WOA09(World Ocean Atlas 2009), SODA 和 AVISO(archiving, validation and satellites oceanographic data) 等气候态的观测资料进行比较. WOA09 下载自美国国家海洋大气管理局(NOAA) 的气候态资料(http://www.nodc.noaa.gov/oc5/WOA09/pr_woa09.html), 其水平分辨率为 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$; SODA 是气候态数据(<http://dsrs.atmos.umd.edu>), 水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$; AVISO 采用的是 1992~2010 年近 19 年地转流资料的月平均结果(<http://www.aviso.oceanobs.com>), 其经向分辨率 $1/3^\circ$, 纬向分辨率为 $1/20^\circ \sim 1/3^\circ$, 在近极地海域加密.

2.1 海表面温度模拟结果

图 1 给出了模式气候态 2 和 8 月的海表面温度分布(图 1(a), (b)), 观测到的 SST 的一些基本特征在模式中得到了非常好的反映. 特别是, 热带地区东西方向 SST 分布的不对称性, 即赤道西太平洋为高于 28°C 的暖池, 而赤道西太平洋是从秘鲁海岸沿赤道向西延伸的冷舌; 热带太平洋 SST 的分布相对于赤道也是不对称的, 东太平洋 10°N 为一个孤立的暖区,

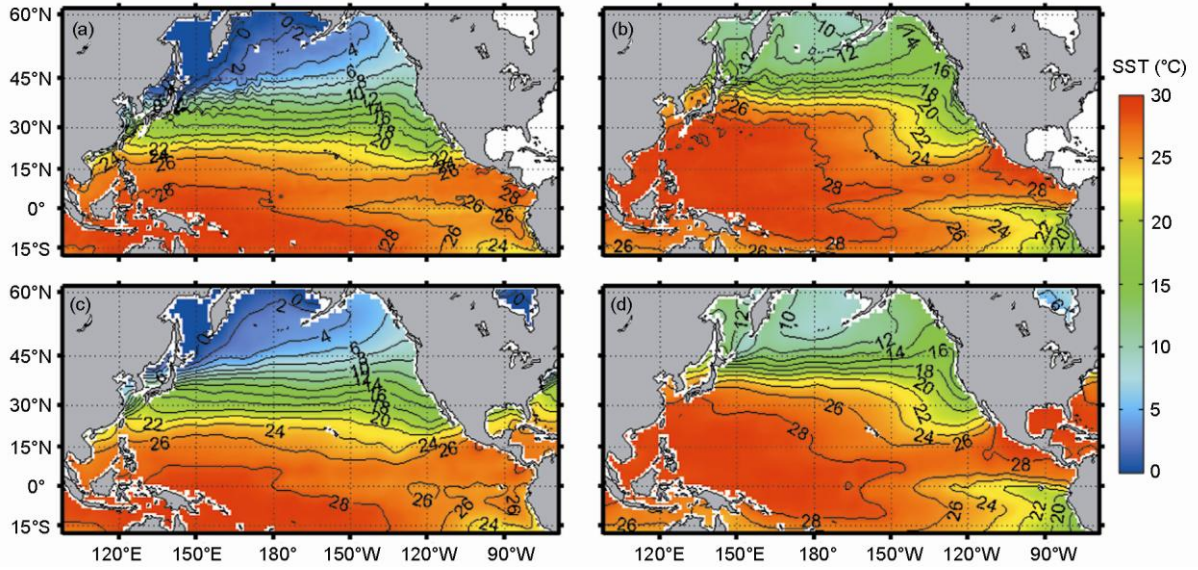


图1 模拟气候态 SST 与 WOA09 资料的比较

(a) 模拟 2 月份结果; (b) 模拟 8 月份结果; (c) WOA09 资料 2 月份 SST; (d) WOA09 资料 8 月份 SST

而对应的南太平洋则为冷舌区;另外, SST 沿经圈方向的分布呈现槽脊的分布形态,即赤道地区有一自东沿赤道向西延伸的冷舌,而其南北两侧的副热带地区则为自西太平洋暖池向东扩展的暖脊.与 WOA09 海洋资料结果(图 1(c), (d))相比,模拟的 SST 大体上在冬季偏低,夏季偏高,在赤道太平洋,模式模拟的温度与 WOA09 资料基本一致;在 40°N 以北海域,模式模拟的 SST 在 2 月份偏低,8 月份偏高.模式采用了高分辨率,这在一定程度上可以更好地模拟赤道太平洋暖池与冷舌的分布情况,但在 40°N 以北的海区的模拟误差则可能是由于模式所使用的 COADS 热通量资料在冬季偏弱,夏季偏强所致,这会对模式模拟结果有一定的影响.

下面我们分别通过公式(1)和(2)两种统计方法^[19]来比较模拟值(ROMS)和 WOA09 数据的差异.ROMS 数值模拟值(Y)和 WOA09 数据(X)的统计关系式为

$$ME = \bar{Y} - \bar{X}, \quad (1)$$

$$RMS = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2 \right]^{1/2}, \quad (2)$$

式中, ME 为平均误差; RMS 为均方根差; i 为月份, $n=12$.

用模式模拟的 SST 与 WOA09 的 SST 在整个北太平洋求误差 ME 发现,在整个赤道太平洋,模式模拟的误差都非常小,接近于 0°C;在 40°N 以北的海区,2 月份误差为负值,中心值约为 -1°C,在 8 月份误

差为正值,中心区的值大约为 1.5°C; SST 年平均的 ME 值在大洋内部通常要比靠近海岸区域小,从整个模拟区域来看,模拟值比 WOA09 值约大 0.04°C.均方根差 RMS 反应的特征与 ME 的特征基本一致,冬季模拟结果要好于夏季,全年平均的 RMS 值为 0.53,这也进一步表明该 ROMS 模式模拟的 SST 结果在一定程度上能够很好再现北太平洋气候态 SST 变化特征.

2.2 海表面高度结果

图 2(a), (b)分别是模式模拟气候态 2 和 8 月份 SSH 的分布,与 SODA 海洋分析资料(图 2(c), (d))和前人的模拟结果^[11,12]相比,模式成功地模拟出了北太平洋的 SSH 分布特征.其中,北太平洋副热带地区在西边界出现 SSH 的极大值,赤道及副热带地区海面西边高、东边低,SSH 自西向东向下倾斜;同时在 40°~60°N 的副极地地区则出现极小值,SSH 自东向西倾斜;经圈方向海面起伏和重力势槽脊结构非常明显,即位于赤道偏南的由南美沿岸自东向西延伸的赤道槽和 3°N 的自西向东扩展的赤道脊,位于 10°N 的北赤道逆流槽和 20°N 的北太平洋脊,以及位于 50°N 的副极地槽.

与 SODA 海洋同化资料相比,模式对副热带太平洋东高西低分布和经圈方向的槽脊结构都有很好的再现,但是,仍然存在一些模拟误差.主要体现在,

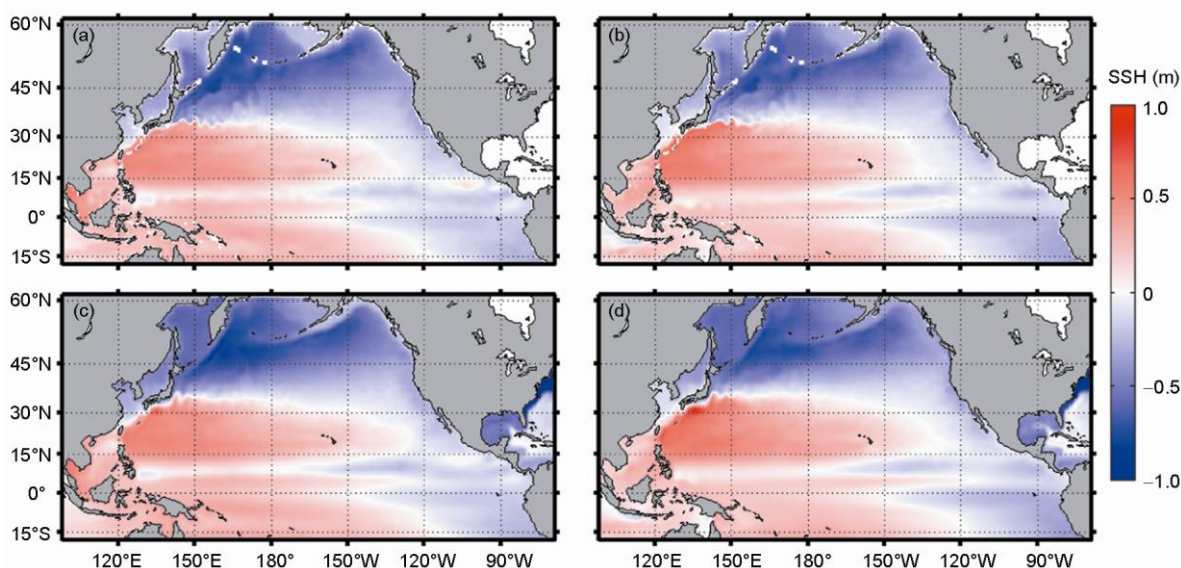


图 2 模式模拟的 SSH 和 SODA 资料的 SSH 的比较

(a) 2 月份模拟结果; (b) 8 月份模拟结果; (c) SODA 资料 2 月份结果; (d) SODA 资料 8 月份结果

北太平洋 45°N 以北的模拟误差偏高(约 0.1 m), 特别是鄂霍次克的误差最大可达 0.2 m; 黑潮及黑潮延伸体的两侧误差也较大, 这可能与模式采用的分辨率有关。

2.3 表层环流模拟结果

图 3(a), (b)给出了模式气候态 2 和 8 月份表层的环流结构图, 从图中可以看出, 本模式能够较好地模拟出太平洋存在的一些大的流系和涡旋, 比如: 黑潮、北赤道流、北赤道逆流等。从模式结果中可以发现, 在北太平洋中纬度地区明显存在 1 个顺时针横贯太平洋的环流圈。北赤道流在 12°N 附近分为南北两支, 北支形成黑潮, 南支形成棉兰老流。黑潮有一个分支通过吕宋海峡入侵南海, 除此之外, 黑潮大部从台湾以东入侵东海, 然后主干沿等深线转向东北方向, 在琉球群岛北部地区分为两支, 一支向西北偏转继而再转向东北经过对马海峡, 进入日本海; 另外一支沿着日本岛南岸向东北方向北上, 在 38°~40°N 附近遇到南下的亲潮后北上受阻, 共同汇成东向的北太平洋海流, 一直流向太平洋东岸, 在加利福尼亚附近受大陆边界阻挡转向南流后再汇入北赤道流向西流动, 这和以往的观测模拟结果都较为吻合^[11~13,20]。与 AVISO 表层地转流(图 3(c), (d))相比, 黑潮及黑潮延伸体的模拟结果较好, 但赤道流系的模拟结果比

AVISO 地转流略偏强。

通过对 SST, SSH 和表层环流模拟结果的对比分析可知, 模式的模拟结果较为合理。故此, 本文在该物理模型的基础上开展了放射性污染物在海洋通道中运输的模拟研究。

3 放射性污染物模拟与预测

在上述环流模式的基础上, 自第 11 个模式年 3 月 11 日起开展了福岛放射性污染物随海流在海洋中 10 a 的运输扩散研究。

3.1 低位涡水输运通道

考虑到放射性污染物有可能附着在颗粒物上并沉降到海水内部, 我们首先对放射性污染物在北太平洋低位涡水输运通道上的输运开展了研究。北太平洋副热带中纬度是低位涡水的主要源地之一, 许多观测资料证实低位涡水存在于等位势密度面 25.4~25.8 σ_θ 之间^[21], 而且北太平洋低位涡水主要分布在 25.0~26.0 σ_θ 等密度面之间^[22]。图 4 是 25.6 σ_θ 等密度面上的流场(3 月)。从图 4 中可以看出, 通道上背景流场的速度在 0.02 m/s 左右, 每年的输运距离大约为 600 km, 因此, 从北太平洋副热带中纬度潜沉的低位涡水随背景流场输运到台湾以东海域的过程大约需要 12 a 的时间, 这也与前人的研究结果一

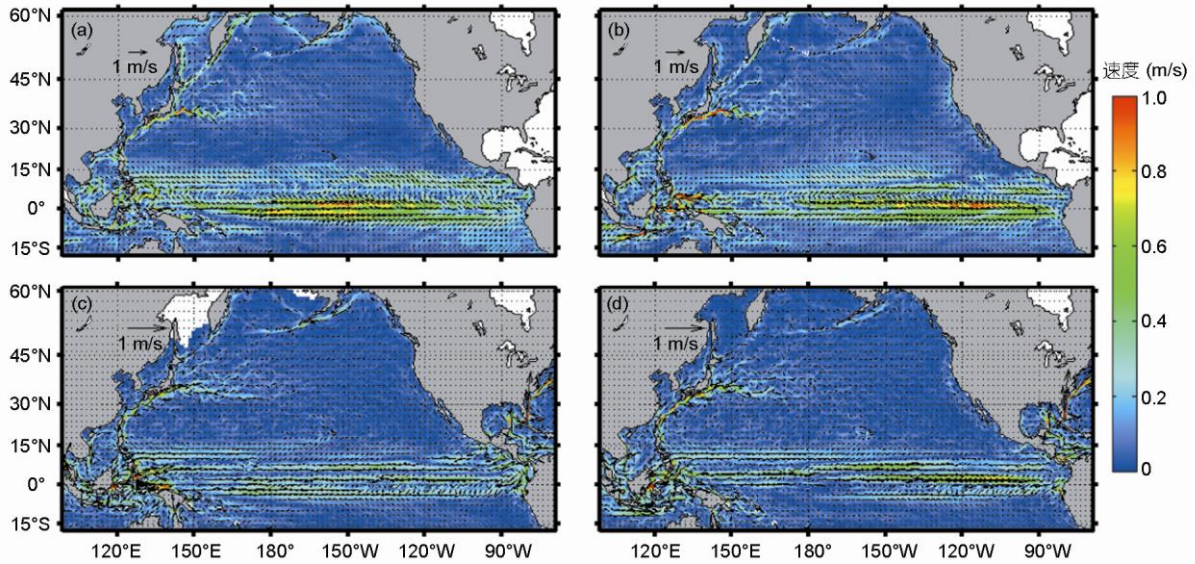


图3 模式模拟的2月份(a)、8月份(b)的北太平洋表层环流结构和2月份(c)、8月份(d)的AVISO表层地转流场

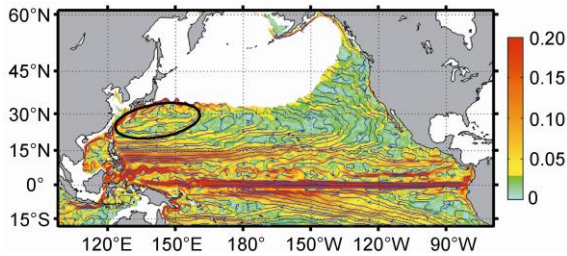


图4 气候态3月份低位涡水输运通道位置及 $25.6\sigma_0$ 等密度面上平均流场(m/s)

图中黑线为根据流线确定的一条低位涡水的输运通道

致^[23]. 从而, 可以预计潜沉到低位涡水团中的放射性污染物需要经历大约 12 a 才有可能到达台湾以东海域.

3.2 海洋输运路径模拟与预测

为了研究放射性污染物的输运路径, 我们设计了第一组实验来讨论核泄漏物质的漂移路径. 首先假设核泄漏物质为理想条件下的质点运动, 且仅随海流漂移和扩散, 不考虑其在海水中的沉降以及自身的衰变等过程, 分别在福岛核电站附近的表层和 200, 500, 1000 m 放置 160 个粒子. 同时, 作为对比, 在黑潮路径上投放了 60 个粒子, 所有粒子在三维水平和垂向深度上都是随海流移动的, 进行了为期 10 a 的 Lagrange 追踪.

表层放射性污染物进入海洋后(图 5(a)), 随着黑

潮延伸体和北太平洋海流向东移动, 主要分为南北两支; 南支在 $170^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{W}$ 海域向南转向并随着赤道流系向西输运, 可以影响到菲律宾以东洋面, 部分放射性污染物通过吕宋海峡进入到南中国海; 北支可以影响到北美西海岸, 并随沿岸流系分成南、北两支, 向北输运部分可以到达白令海峡. 200 m 层放射性污染物进入海洋后(图 5(b)), 一部分污染物的输运与表层相似, 只是输运速度较慢, 另外一部分污染物可以沿低位涡水团影响到台湾以东海域. 由于深层环流的流速比较慢, 放射性污染物自 500 m 以下深度进入海洋后, 输运非常的缓慢, 在 10 年内到达太平洋中央海盆内(图略). 图 5(c)是 1999~2010 年间的 43 个福岛附近海域的 Argos 剖面浮标资料轨迹 (<http://www.nodc.noaa.gov/argo/data/>), Argos 浮标在水平方向主要是向太平洋以东洋面运动, 与模型 Lagrange 追踪结果(图 5(a), (b))在一定程度上相近, 但其移动速度较模型追踪结果(图 5(a), (b))慢, 初步分析是由于 Argos 剖面浮标水平和垂向运动并不是完全随海流运动所致. Argos 剖面浮标是通过定期自动控制、完成垂直升降运动, 最大测量深度可达 2000 m, 且水下流速相对较弱, 故此二者存在一定差异.

在上述实验的基础上, 我们假设核泄漏物质不受海水垂向运动影响, 同样在福岛核电站附近放置 160 个粒子, 所有粒子仅在二维水平方向上是随海流移动的, 进行了 10 a 的追踪. 粒子追踪结果显示(图

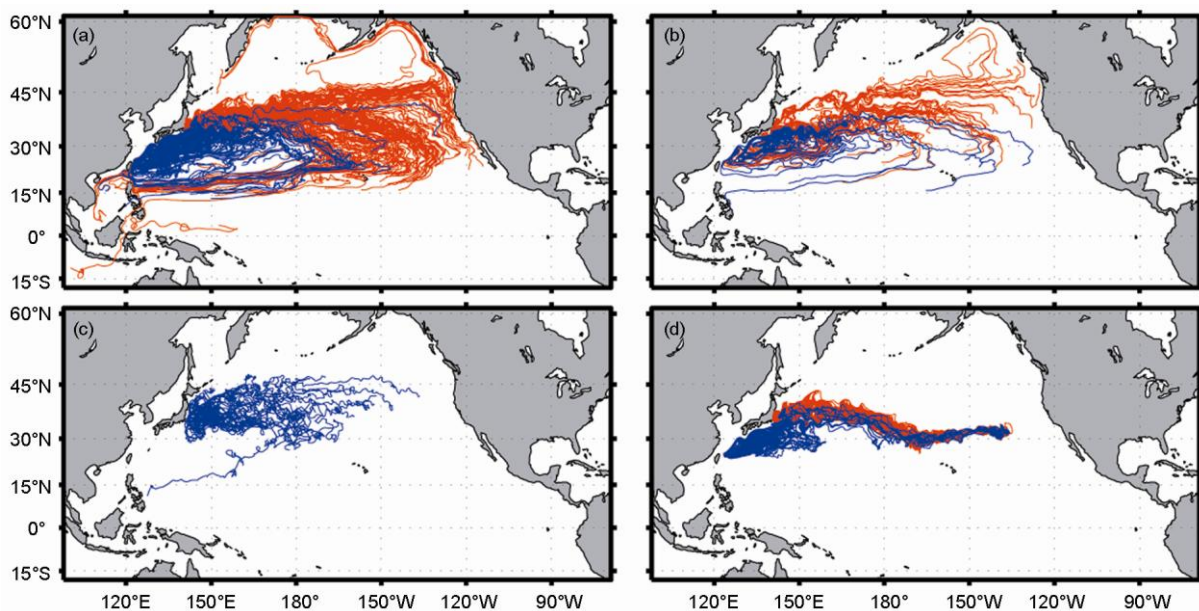


图 5 福岛放射性污染物三维 Lagrange 追踪在水平方向的移动轨迹

(a) 表层; (b) 200 m; (c) Argos 浮标轨迹; (d) 表层二维追踪的移动轨迹. 红线代表福岛核电站周围释放的粒子, 蓝线代表黑潮流径上释放的粒子

5(d)), 福岛周围的粒子经过 10 a 后在 30°N, 135°W 区域附近聚集.

从上述三维和二维在表层不同的追踪结果我们可以看出, 采用两种方法得出的结果存在较大差异, 表层二维追踪方法在某种程度上并不能完全体现粒子在三维海水中的运移情况.

3.3 放射性污染物浓度模拟与预测

放射性同位素 ^{137}Cs 有 30 a 的半衰期, 可以对人类的生命健康产生数十年的影响, 因此人们对其在海水中的输运扩散过程尤为关注. 基于上述气候态物理背景场, 在物质输运方程中考虑了放射性污染源释放和衰变过程, 同时考虑了放射性污染物附着在颗粒物上的沉降过程, 我们对放射性同位素 ^{137}Cs 的浓度在输运过程中的变化进行了预测. 其中, 模式中设定放射性同位素 ^{137}Cs 半衰期为 30 a, 沉降速率假定为 5 m/d. 由于目前 ^{137}Cs 直接释放到海洋中和间接通过大气沉降进入海洋的总量尚不确定, 为了模拟放射性污染物浓度变化趋势, 所以我们在模式起始阶段假设在表层每秒释放 1 个单位的放射性污染物, 释放 1 个月之后切断源的释放. ^{137}Cs 未来 10 年的分布趋势预测如图 6 所示, 由于篇幅所限, 本文仅给出释放后的第 2 年和第 8 年 ^{137}Cs 的表层分布特征.

由模拟结果可知, 放射性污染物 ^{137}Cs 排放入海后, 主要随大洋表层流动(黑潮延伸体)整体向东漂移扩散; 当停止排放后, 污染区由于受到流速较强的黑潮延伸体入侵, 逐渐分布在黑潮延伸体的两侧, 如图 6(a)所示, ^{137}Cs 在释放后的第 2 年主要分布在黑潮延伸体南、北两侧, 且浓度偏低, 而浓度高值区位于太平洋海盆中部, 此外, 还有少量 ^{137}Cs 随表层洋流向西南方向扩散. 黑潮延伸体北侧污染物主要随北太平洋暖流继续向东偏北方向扩散, 并于第 5 年前后到达北美西海岸; 南侧分支有整体向南、向西运动的趋势, 至第 8 年, 北太平洋污染物分布区域扩大, 但浓度进一步降低; 放射性污染物 ^{137}Cs 输运到北美西海岸后, 分为南北两个分支, 进而影响到整个北美西海岸, 最远可达白令海峡; ^{137}Cs 的高值中心位于夏威夷群岛以东, 较之前浓度有所降低(图 6(b)). 到第 10 年, ^{137}Cs 几乎在整个 15°N 以北的太平洋海区都有分布, 极大值区依然存在于夏威夷群岛以东海域, 在黑潮流径以及中国近海也受到放射性污染物的影响, 但浓度非常低(图略).

4 结论

针对 2011 年 3 月 11 日日本地震和海啸引发的福岛核电站放射性污染物泄漏事件, 本文利用 ROMS

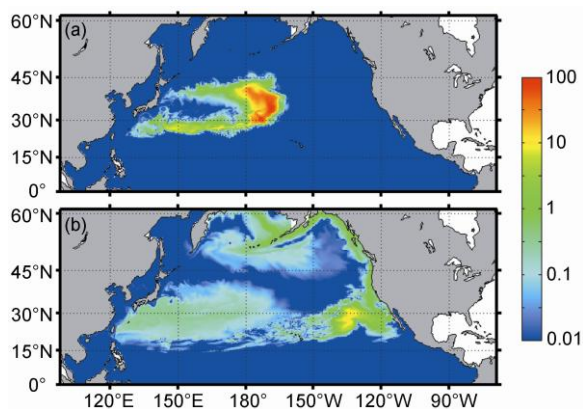


图6 模式预测的 ^{137}Cs 表层浓度分布
(a) 2 a; (b) 8 a

海洋环流模式,对福岛放射性污染物随海流的输运路径以及输运过程中表层的浓度变化进行了研究,并分析了 $25.6\sigma_\theta$ 等密度面流场的低位涡水输运通道,得到以下主要结论:

(1) 潜沉到低位涡水中的放射性污染物随背景流

场输运到台湾以东海域大约需要 11.5 a 左右的时间。

(2) 表层放射性污染物随着海流分为南北两支,南支折向南后又沿赤道流系向西输运,影响到菲律宾以东洋面;北支到达北美西海岸后随沿岸流向南北输运,北向输运的污染物可以影响到白令海峡。200 m 深层的放射性污染物进入海洋后的输运分为 3 个部分:一部分沿深层洋流向西南输运;一部分随低位涡水团输运影响台湾以东海区;最后一部分随黑潮延伸体向东输运,并分为两支,其中一支会输运到北美西海岸,另外一支向南影响到夏威夷岛周围海域。而 500 m 层以下放射性污染物的输运非常的缓慢,在 10 a 后还主要位于太平洋中央海盆内。

(3) 放射性同位素 ^{137}Cs 的排放入海后,随海流继续向东扩散,其高值区到第 2 年主要位于太平洋海盆中部;到第 8 年, ^{137}Cs 的高值区位于夏威夷群岛以东,北美西岸也有较高浓度的分布;到第 10 年,几乎整个 15°N 以北的太平洋海区都有放射性污染物分布,包括中国近海区域,但浓度非常低。

参考文献

- Chino M, Nakayama H, Nagai H, et al. Preliminary estimation of release amounts of ^{131}I and ^{137}Cs accidentally discharged from the Fukushima Daiichi nuclear power plant into the atmosphere. *J Nucl Sci Technol*, 2011, 48: 1129–1134
- Butler D. Radioactivity spreads in Japan. *Nature*, 2011, 471: 555–556
- Yasunari T J, Stohl A, Hayano R S, et al. Cesium-137 deposition and contamination of Japanese soils due to the Fukushima nuclear accident, *Proc Natl Acad Sci USA*, 2011, 108: 19530–19534
- Bowyer T W, Biegalski S R, Cooper M, et al. Elevated radionuclides detected remotely following the Fukushima nuclear accident. *J Environ Radioact*, 2011, 102: 681–687
- Masson O, Baeza A, Bieringer J, et al. Tracking of airborne radionuclides from the damaged Fukushima Dai-ichi nuclear reactors by European Networks. *Environ Sci Technol*, 2011, 45: 7670–7677
- 乔方利, 王关锁, 赵伟, 等. 2011 年 3 月日本福岛核泄漏物质输运扩散路径的情景模拟和预测. *科学通报*, 2011, 56: 964–971
- Yutaka K. Monitoring of aerosols in Tsukuba after Fukushima Nuclear Power Plant incident in 2011. *J Environ Radioact*, 2011, doi: 10.1016/j.jenvrad.2011.10.011
- Stohl A, Seibert P, Wotawa G, et al. Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: Determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition. *Atmos Chem Phys*, 2011, 11: 28319–28394
- Morino Y, Ohara T, Nishizawa M. Atmospheric behavior, deposition, and budget of radioactive materials from the Fukushima Daiichi nuclear power plant in March 2011. *Geophys Res Lett*, 2011, 38: L00G11
- Fang G H, Wei Z X, Wang Y G, et al. An extended variable-grid global ocean circulation model and its preliminary results of the Equatorial Pacific Circulation. *Acta Oceanol Sin*, 2004, 23: 23–30
- 徐永福, 李春阳, 赵亮, 等. 一个太平洋海盆尺度环流模式及其模拟结果. *大气科学*, 2006, 30: 927–938
- 莫慧尔, 俞永强, 刘海龙, 等. 一个高分辨率太平洋-印度洋海盆环流模式的初步结果. *热带海洋学报*, 2009, 28: 56–65
- Cai Y, Wang Z G. Simulation of Pacific Ocean Circulation based on Global Warming from 1960 to 1999. *Mar Sci Bull*, 2010, 12: 10–15
- Tsumune D, Tsubono T, Aoyama M, et al. Distribution of oceanic ^{137}Cs from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant simulated numerically by a regional ocean model. *J Environ Radioact*, 2011, doi: 10.1016/j.jenvrad.2011.10.007
- Malcolm J, Roberts A, Clayton M, et al. Impact of resolution on the Tropical Circulation in a matrix of coupled models. *J Clim*, 2009, 22: 2541–2556

- 16 Shchepetkin A F, McWilliams J C. The Regional Ocean Modeling System (ROMS): A split-explicit, free-surface, topography following coordinates oceanic model. *Ocean Model*, 2005, 9: 347–404
- 17 Gates W L, Mitchell J F B, Boer G J, et al. Climate modeling, climate prediction and model validation. In: Houghton J T, Canlendar B A, Varney S K, eds. *Climate Change 1992, The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 101–134
- 18 赵亮, 徐永福. 边界条件对北太平洋海盆尺度环流模式的影响. *海洋科学进展*, 2006, 24: 292–300
- 19 高松, 吕咸青. HYCOM 模式对赤道及北太平洋海表温度的模拟. *海洋科学进展*, 2007, 25: 257–267
- 20 Xia C S, Qiao F L, Zhang Q H, et al. Numerical modeling of the quasi-global ocean circulation base on POM. *J Hydrodyn*, 2004, 16: 537–543
- 21 Kobashi F, Kawamura H. Variation of sea surface height at periods of 65–220 days in the subtropical gyre of the North Pacific. *J Geophys Res*, 2001, 106: 817–831
- 22 Suga T, Kimio H. The subtropical mode water circulation in the North Pacific. *J Phys Oceanogr*, 1995, 25: 958–970
- 23 Liu Q Y, Hu H B. A subsurface pathway for low potential vorticity transport from the central North Pacific toward Taiwan Island. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L12710, doi: 10.1029/2007/GL029510