

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2016.0086

容逸能,徐瑞,梁湘三,等.2016.福岛核泄漏事件对中国海污染的研究[J].环境科学学报,36(9):3146-3159

Rong Y N, Xu R, Liang X S, et al. 2016. A study of the possible radioactive contamination in the China Seas from the Fukushima nuclear disaster [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 36(9): 3146-3159

福岛核泄漏事件对中国海污染的研究

容逸能¹, 徐瑞^{2,4,*}, 梁湘三^{1,3}, 赵远冰¹

1. 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044
2. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081
3. 南京信息工程大学海洋科学学院, 南京 210044
4. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044

收稿日期: 2015-12-08 修回日期: 2016-03-07 录用日期: 2016-03-07

摘要: 2011年3月11日日本地震和海啸导致了日本福岛核电站核放射性物质泄漏事件.利用ROMS区域海洋模式对北太平洋环流进行模拟,并在此流场中加入核放射性污染物进行测试核放射性污染物是否能够输运到中国海域.在不考虑背景场浓度的情况下,福岛泄漏的核放射性物质在泄漏后4年能基本侵入整个中国海区,并且在10年内布满整个北太平洋区域,最大值区在北美的西岸外海.相较而言,将国际原子能的观测资料进行资料同化作为背景场使模拟更接近于观测事实.考虑了背景场的模拟显示,2019年进入东中国海的核放射性物质总量达到峰值.除此之外,还计算了各个海峡核放射性污染物通量及其随时间的变化,发现核放射性污染物主要通过吕宋海峡入侵南中国海;台湾海峡、台湾以东洋面为侵入东中国海的主要通道;核放射性污染物通过托克拉海峡、对马海峡流出东中国海.同时计算表明在未考虑径流的情况下,中国东部沿海地区的核放射性污染物浓度有着明显的季节特征,华南沿海冬春核污染物浓度高于夏秋两季,而华东沿海则相反.

关键词: 福岛核泄漏; 放射性污染; 数值模拟; 中国海

文章编号: 0253-2468(2016)09-3146-14 中图分类号: X55 文献标识码: A

A study of the possible radioactive contamination in the China Seas from the Fukushima nuclear disaster

RONG Yineng¹, XU Rui^{2,4,*}, LIANG Xiangsan^{1,3}, ZHAO Yuanbing¹

1. School of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044
2. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081
3. School of Marine Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044
4. School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Received 8 December 2015; **received in revised form** 7 March 2016; **accepted** 7 March 2016

Abstract: An earthquake and the subsequent tsunami on March 11, 2011, triggered a chain of disastrous nuclear leaks in Fukushima, Japan. In this study, the Regional Ocean Modeling System (ROMS) is used to simulate the oceanic circulation and the resulting radioactive concentration distribution and variation in North Pacific and the China Seas. We have found, after a series of experiments, that in the absence of the background concentration, radionuclides begin to enter the China Seas on a large scale four years after the accident, and that in 10 years they will appear everywhere in North Pacific, with the maximum near the western coast of the United States. The simulation with background concentration assimilated (data from International Atomic Energy Agency) reveals that the total amount of the radioactive material in the East China Sea will reach maximum in 2019. We have computed the fluxes through all the waterways to these seas, and found that Luzon Strait, Taiwan Strait and the east region of Taiwan are the main entrances for the

基金项目: 国家自然科学基金(No. 41276032); “全球变化与海气相互作用”专项(No. GASI-IPOVAI-06); “江苏特聘教授计划”; 2015年江苏双创团队项目

Supported by the National Natural Science Foundation of China (NSFC) (No. 41276032), the “Global Change and Air-Sea Interaction” Special Program(No. GASI-IPOVAI-06), the Jiangsu Provincial Government through the “Jiangsu Specially-Appointed Professor Program” (Jiangsu Chair Professorship) and the 2015 Jiangsu Program of Entrepreneurship and Innovation Group

作者简介: 容逸能(1994—),男,博士研究生,E-mail: yinengrong@foxmail.com; * **通讯作者(责任作者)**,E-mail: xurui0261@hotmail.com

Biography: RONG Yineng (1994—), male, Ph.D. candidate, E-mail: yinengrong@foxmail.com; * **Corresponding author**, E-mail: xurui0261@hotmail.com

radionuclides, which spread into East China Sea through Tokara Strait and Tsushima Strait. It is shown that the radionuclide concentration along the China coast may vary in season. Generally, it is high in winter and spring, and low in summer and autumn along the southern China coast, while the trend is reversed along the eastern coast.

Keywords: Fukushima nuclear accident; radioactive contamination; numerical simulation; China Seas

1 引言(Introduction)

2011年3月11日,距日本本州岛仙台港以东大约130 km的外海海底(38.3°N,142.4°E)发生9.0级地震,此次地震是日本有观测记录以来最大规模的地震,同时地震引发了高达16 m的海啸,海啸波冲击日本东部海岸,对日本东部沿岸造成十分惨重的破坏。受到此次地震和其引发的海啸影响,位于日本的最大核电站福岛核电站受到严重损毁,大量的核放射性物质释放到大气和海洋中,对全球环境造成了很大的影响,尤其是北太平洋地区的环境造成了十分严重的影响,因此本次事故引起了全球范围内的广泛关注(Bois *et al.*, 2012; Tsumune *et al.* 2012)。

日本福岛第一核电站,是世界上最大的发电站之一。地震和海啸直接导致核电站冷却系统无法正常运转,反应堆内正常核物质反应后的余热不能够有效移除,从而导致了反应堆堆芯熔毁,引发爆炸,使放射性物质直接泄漏到大气和海洋之中(Chino *et al.*, 2011; Stohl *et al.*, 2012)。观测结果表明:核电站附近海域放射性物质含量急剧升高(Bois *et al.*, 2012),并且在北半球的很多大气观测站(Chino *et al.*, 2011; 王蕾等, 2012)与航测数据(程卫亚等, 2012)都检测到了放射性污染物浓度不同程度的升高现象。日本文部科学省通过对每月沉积样品进行检测,发现 ^{131}I (半衰期为8.02 d), ^{134}Cs (半衰期为2.06年)和 ^{137}Cs (半衰期为30.07年)是本次事故排放的主要放射性物质(MEXT, 2012),其中 ^{137}Cs 有着较长的半衰期,被认为是本次事件对海洋影响最重要放射性物质(Povinec *et al.*, 2013),其对人类的危害主要是 β 辐射,若摄入较大的放射性铯,可引起急性和慢性损伤并有可能引起软组织肿瘤等疾病(环境保护部, 2012)。

此次核泄漏事故释放的放射性物质会随着大气和海洋的运动而运输和扩散,乔方利等(2011)给出了核泄漏物质的运输扩散主要通过以下3类通道:大气中随气流的快速运输通道、海洋中随海流的慢速运输通道和包括人类活动在内的生物运输通道。大气通道运输速度比较快,海洋通道运输相对

缓慢,生物通道一般只有在研究局部地区的影响时才会考虑。通过各地的观测数据和前者的数值模拟中可以得知,核放射性物质通过大气运输通道在3~4个月内浓度会迅速减少并沉降在海洋和陆地上(Kanai, 2012; Katata *et al.*, 2012; 聂新旺等, 2012),同时张文杰等(2012)、王蕾等(2012)、万恩源等(2012)在我国各大城市的监控数据也表示此次事故中释放的核放射性粒子并没有通过大气运输通道大量运输到我国。吴俊文等(2012)也通过对中国海域的取样进行分析来证明了在大气沉降方面没有大量核放射性物质输送到我国外海。

由于福岛核电站位于海边,事故后一部分的核放射性物质喷发到空气中,其余则是作为废弃的冷却水直接排放到海中(Inoue *et al.*, 2012)。所以相比于大气通道核放射性物质的运输,海洋通道的分析就显得十分重要了。由于观测数据的缺乏以及数据监测的困难,所以准确有效的数值模拟可以有效的彰显海洋通道中和放射性物质的运输(Buesseler *et al.*, 2011; Stohl *et al.*, 2012)。海洋通道的运输主要分为3层:表层、次表层和深层3个层次,大部分学者的模拟结果表示主要的核放射性物质扩散和运输是处于海洋表层和次表层(王辉等, 2012)。王辉等(2012)、何晏春等(2012)、Povinec等(2013)的模拟结果中可以知道从日本福岛运输核放射性物质到中国台湾以东海域大约需要12年的时间,而主要的放射性粒子中 ^{137}Cs 的半衰期30.07年,这就说明放射性粒子在其的半衰期内是能够达到我国外海,但是他们并没有很好的模拟出核放射性物质运输到我国海域的具体路径。

如果关于核放射性物质在海洋通道运输的模拟预测是真实的,那么核放射性物质是通过哪些通道运输到中国各个海域?是否只有一条路径把核放射性物质运输到中国?如果得知其运输路径,则能够更好的了解核放射性物质的运输到中国海的方式和对中国外海的影响。本文将对核放射性物质在海洋中的运输进行中长期的模拟,根据模拟结果来呈现核放射性物质从日本是如何到达中国外海,进一步了解日本福岛核事故对我国海域的影响。

2 数值模式介绍和设置 (Model description and configuration)

2.1 ROMS 模式

ROMS (Regional Ocean Model System) 是一个提高了对近海区域的模拟能力而设计的海洋数值模式 (Shechepetkin and McWilliams, 2005). 该模式以随底坐标系和任意水平正交坐标系下所求解出来的不可压缩、自由海表面、静压近似、Boussinesq 近似、Reynolds 平均的原始 Navier-Stokes 方程组作为控制方程组 (Penven *et al.*, 2010). 由于是随底坐标, 它能够适当的描述流场受到地形的影响. ROMS 所使用的水平压力梯度演算方案能大大提高在地形变化大的区域的水平压力梯度计算精度, 且对于示踪物的计算, 已有一套完备而先进的方法 (Shechepetkin and McWilliams, 2005). 除此之外 ROMS 模型能够准确模拟出自由表面的时间演化, 并能设置开放的侧边界条件 (Marchesiello *et al.*, 2001). 该模式也逐渐被应用于阿拉斯加的威廉王子湾内环流 (Wang *et al.*, 2012)、法国沿岸陡坡环流 (Bruneau *et al.*, 2011)、加州南部沿岸流 (Dong *et al.*, 2012) 等区域. 前人已采用 ROMS 来研究日本福岛放射性污染物在北太平洋海水中的输运 (王辉等, 2012).

本文用 Agrif_v3.1.1 版本的 ROMS 模式进行数值模拟. 假设放射性污染物浓度 C (单位为 $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$, 其中 Bq 用于衡量放射性物质或放射源活度的计量

单位. $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 反映了每立方米水中每秒放射性物质的放射性强度) 在流场中, C 的演化输运方程为:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla C = - \frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{C'w'} - V_{\theta} \frac{\partial C}{\partial z} \right) + D_c - \lambda C,$$

式中, $\lambda = \frac{\log 2}{T_0}$ 为放射性污染物的半衰期; $\vec{v} \cdot \nabla C$

为平流项; D_c 为水平耗散项; V_{θ} 为分子耗散系数;

$\overline{C'w'}$ 为垂向 Reynolds 应力项, $\overline{C'w'} = -K_M \frac{\partial C}{\partial z}$ 为了

使方程封闭, 令 $\overline{C'w'} = -K_M \frac{\partial C}{\partial z}$ 进行参数化过程, K_M

为垂向涡度粘性系数.

2.2 模式设置

模拟区域范围是纬度范围为 $0^{\circ} \sim 68^{\circ} \text{N}$, 经度范围为 $90^{\circ} \text{E} \sim 70^{\circ} \text{W}$, 它包含了整个北太平洋地区并考虑到赤道为固体边界的假设. 模式中设定最小水深为 15 m, 最大水深为 5000 m, 模式的水平网格分辨率为 $1/8^{\circ}$, 垂向为随底坐标系, 共计 22 层. 模式中的地形数据是美国地球物理中心 (NGDC, U.S. National Geophysical Data Center, <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>) 发布的 ETOPO2 地形数据, 该数据采用的是 UTM/WGS84 投影系统, 可以很好地反映出整个模拟区域的海底地形变化. 整个模拟区域如图 1 所示, 其 4 个方向边界都设置为闭边界, 启动方式为热启动, 未考虑径流和潮汐.

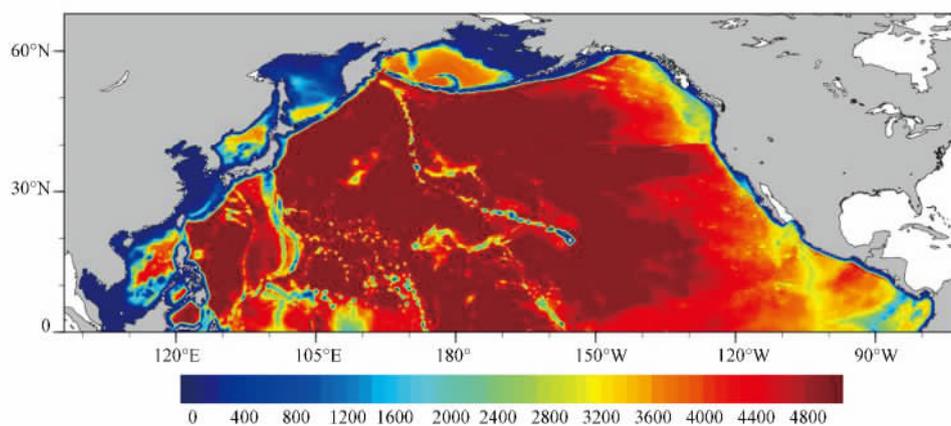


图 1 模式区域及地形特征

Fig.1 Model domain and the characteristics of the terrain

模拟所用的初始场所需的各层流速、温度、盐度以及海平面高度资料由 HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model) 提供, 精度为 $1/12^{\circ}$. 而模拟所用的强迫场则主要是每日表面风场、辐射通量、

降水、比湿、温度等气象变量. 从时间上分为两部分, 一部分是由 NOAA NCEP (National Oceanic and Atmospheric Administration, National Centers for Environment Prediction, $1.875^{\circ} \times 1.875^{\circ}$) 提供的, 其

时间跨度为 2001 年 1 月至 2015 年 8 月底.另一部分则是 NOAA 的 GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) 提供的模拟输出结果 CM3_sstClim. 该资料是控制海表温度的用于第 5 次气候评估 (AR5) 的 CMIP5 气候试验 (第 1 次试验) 输出结果, 精度是 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 每 3 h 输出 1 次, 时间跨度为 2015 年 9 月至 2021 年 12 月底.

由于 HYCOM 再分析数据采用了 NOAA 提供的大气模式输出的结果进行积分计算 (<http://hycom.org/about>) , 因此可以减少由于资料之间的不协调所导致热启动积分发散的几率.

2.3 资料同化

20 世纪 50 年代起, 国际上的核试验将大量的放射性核物质排入海洋, 至 20 世纪 80 年代中期 ^{137}Cs 合计总量大致在 800 PBq 以上, 即 8.00×10^{17} Bq (赵昌等 2015) , 而考虑到 ^{137}Cs 的半衰期有 30 年之长, 不考虑沉降, 2011 年整个海洋中 ^{137}Cs 浓度至少有 4.48×10^{17} Bq. 而本次模拟的日本核泄漏事件直接排入海洋的 ^{137}Cs 总量各方虽然意见不一, 但都认为不超过 42 PBq (赵昌等 2014) , 而太平洋作为全球最大的海洋, 其残留的 ^{137}Cs 放射性浓度仍就占据事件发生后太平洋的总的 ^{137}Cs 放射性浓度中很大的比例. 根据国际原子能组织 (IAEA , International Atomic Energy Agency) 多年对 ^{137}Cs 的表层观测数据 (<https://maris.iaea.org/Search/Search.aspx>) 表明, 海洋表层 (0.5 m) 核放射量一直维持在一个较高的水平, 2011 年日本核泄漏事件前 10 年内整个北太平洋表面 ^{137}Cs 平均浓度在 $1.54 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右. 如果不考虑背景场直接在模式中加入日本核泄漏事件后排入海洋中的 ^{137}Cs 浓度, 那么到达中国沿海地区时, 其浓度最多不超过 $0.5 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ (赵昌等 2014; 王辉等 2012) , 与观测的浓度相差很大. 因此需要对现有的日本核泄漏事件前的北太平洋的 ^{137}Cs 观测资料进行资料同化, 制作一个 ^{137}Cs 背景浓度场.

由于日本核泄漏时间之前观测资料有限, 且考虑到有一定量从大气中沉降到海洋中的 ^{137}Cs , 本文先不加入背景场, 从 2011 年 4 月 1 日开始, 仅加入直接排放到海洋中的 ^{137}Cs 总量, 具体水平分布与垂直分布与加入背景场后一致, 具体见下文, 进行模拟. 模拟时段从 2011 年 4 月 1 日开始至 2021 年 12 月 31 日结束, 共近 10 年, 并输出 2011 年 8 月之前各层每日的浓度平均值用来参照筛选构成背景

场的观测点, 以及 2011 年 8 月至 2021 年 12 月各层月平均浓度用来与前人结果作对比. 本文将 IAEA 的 ^{137}Cs 表层观测数据与模拟数据进行比较, 假设表层 ^{137}Cs 的日平均浓度不大于 $0.001 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 处为未受到直接排放到海洋中的 ^{137}Cs 影响的区域, 大致推测出 2011 年 3 月至 2011 年 7 月非直接排放到海洋中的 ^{137}Cs 影响的区域. 本文采用 Lozano 提出的基于 Gauss-Markov 定理的客观分析方法 (Liang , 2002) 对 IAEA 的 ^{137}Cs 表层观测数据 (1998 年至 2011 年 3 月, 以及 2011 年 3 月至 2011 年 7 月未被影响的地区) 共 212 个点进行资料同化.

将本文客观分析得到的表层分析场与前人模拟得到的结果 (赵昌等 2015) 和观测数据 (吴俊文等 2012) 相比较 (表 1) . 观测数据共 6 个, 其中有 4 个是本文得到的表层分析场浓度的相对误差绝对值是低于前人的模拟结果, 仅有 2 个高于前人结果. 大体而言, 本文得到的表层分析场浓度与前人模拟的均比观测值要高, 但本文的背景场浓度总体而言相对误差绝对值较小. 由此可见, 本文采用客观分析得到的背景场是基本可信的.

表 1 观测结果 (吴) 、数值模拟 (赵) 与本研究模拟结果的比较
Table 1 Comparison among observations by Wu *et al* (2012) , simulations by Zhao *et al* (2015) , and ours

纬度	经度	观测浓度		赵昌等 (2015) 模拟		本文模拟	
		浓度 / ($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$)	相对误差	浓度 / ($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$)	相对误差	浓度 / ($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$)	相对误差
32.01	126.48	1.01 ± 0.06		1.33	31%	1.22	20%
36.05	123.50	1.10 ± 0.07		1.30	20%	1.20	10%
20.50	122.29	1.14 ± 0.07		1.29	13%	1.25	9%
29.64	123.04	1.32 ± 0.13		1.35	2%	1.19	-10%
32.00	124.00	1.33 ± 0.10		1.31	-2%	1.19	-11%
18.00	116.00	1.42 ± 0.09		1.52	7%	1.38	-2%

福岛核电站释放出来的主要放射性污染物 ^{137}Cs 有 30 年的半衰期, 就说明在至少 30 年内能够持续影响放射性粒子所经过的地区, 因此本文采用 5 PBq 作为本次直接排放至海洋中的 ^{137}Cs 的总量 (赵昌等 2014) , 且认为该放射性元素是影响海洋中放射性污染物的主要因素. 为了避免数值积分不稳定, 本文将总量放置在以福岛核泄漏地点 (37.42°N , 141.03°E) 为中心, 水平方向以该中心为原点, 浓度在半径 2 度以内区域按等差序列递减, 2 度时浓度为 0; 垂直方向上假定混合层为 100 m 的深度, 各层浓度在表层最大, 100 m 深处为 0, 也是按等差序列递减, 给出日本核泄漏直接排放进入太平洋的

^{137}Cs 浓度. 加上背景场各层浓度, 则可以大致得出核泄漏的 ^{137}Cs 浓度的初始场. 其中背景场各层浓度由首层的浓度 (C_0) 给出: $C(z) = C_0 \times 10^{-0.0005z}$ $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (Tsumune *et al.*, 2003). 模式中 PASSIVE_TRACER 是模式添加示踪物运行的开关, 而 TS_HADV_WENO5 则是示踪物五阶 WENOZ 差分格式拟单调平流方案, 该方案能够大大减小在示踪物计算过程中的不稳定性 (Penven *et al.*, 2010). 给模式加入 ^{137}Cs 变量后, 打开 ROMS 模式中 PASSIVE_TRACER 和 TS_HADV_WENO5 开关, 进行积分计算.

3 模式模拟结果和验证 (Model results and validation)

模式采用热启动积分, 很快达到了平衡态, 到 2008 年后期时, 已经与 SODA 资料吻合得较好. 为了验证模式的模拟能力, 本文利用模式模拟的 2009 年平均态的海表面温度场 (Sea Surface Temperature, SST)、流场等一系列模拟结果与 SODA (Simple Ocean Data Assimilation) 2009 年平均态的结果进行对比, 来验证模式模拟结果.

3.1 海表面温度模拟结果

图 2 为模式模拟中整个北太平洋地区的温度与速度场和 SODA 资料的 2009 年平均温度以及速度场.

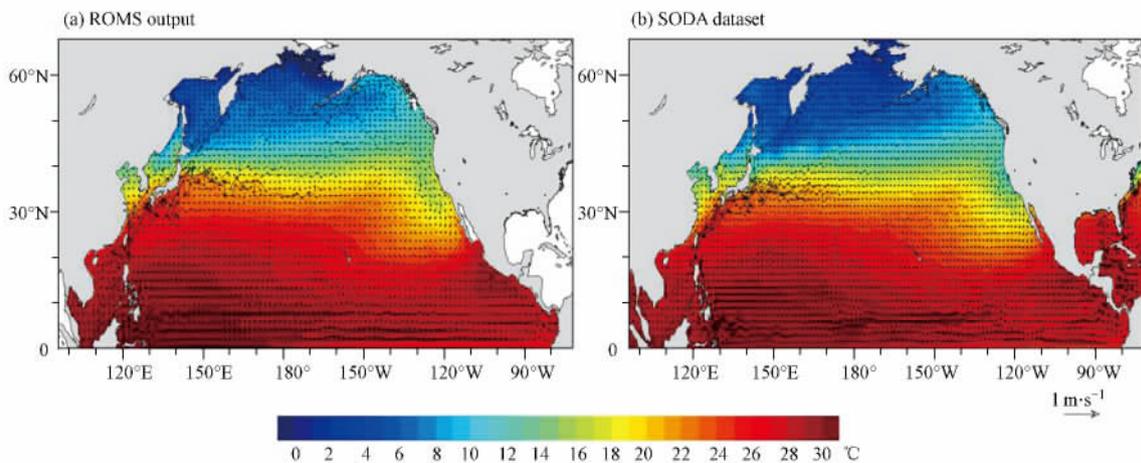


图 2 2009 年北太平洋平均海表面温度与海表流速场 (a. 模式模拟结果; b. SODA 资料)

Fig. 2 Mean Annual sea surface temperature (shaded, Units: $^{\circ}\text{C}$) and surface velocity field (vector) of North Pacific in 2009 (a. model output; b. SODA dataset)

3.2 流场模拟结果

核放射性污染物的扩散是通过流场进行运输的, 流场模拟的真实与否十分必要. 图 2 中矢量场分别是模式模拟的结果和 SODA 资料的表层流场.

图中可以看到, 模式模拟的海表面温度分布的一些基本特征都很明显的模拟出来. 热带太平洋地区呈现东西方向的温度分布不对称, 是一个西高东低的温度趋势. 西太平洋赤道暖池很好的在西太平洋赤道地区模拟出来, 同时有从东向西延伸的冷舌从南美洲西岸向东入侵该暖池, 把东西赤道太平洋地区的温度划分为暖区和冷区两个区域. 对西太平洋地区产生极大影响的黑潮和黑潮延伸体也展现在图中, 可以从图中看到黑潮流从赤道地区经台湾东侧之后分为两支, 一支向中国东海入侵, 另外一支在沿琉球群岛继续向日本东南地区, 最后在 36°N 左右与亲潮带来的寒流交汇, 然后向东延伸, 形成黑潮延伸体. 在黑潮延伸体的模拟中, 几个暖脊的弯曲很好的模拟了出来. 中美热带地区西岸的近岸地区的高温暖池, 模式模拟结果中该暖池的温度分布和暖池位置都与 SODA 资料中的结果十分匹配. 模式模拟结果中整个北太平洋地区的温度梯度分布、中低纬度地区的温度西高东低都和对应的 SODA 资料中的结果十分契合.

综上, 可以证明模拟的结果在海表面温度的模拟上能够很好的呈现出北太平洋的基本特征, 同 SODA 资料结果的对比也基本一致, 所以说明模式模拟的海表面温度是可信的.

从图中(图 2a) 可以看出北太平洋存在的大型环流系统和主要涡旋都模拟了出来, 黑潮、黑潮延伸体、北赤道暖流等大型流场都很好的呈现了出来. 北赤道流由东向西流, 遇到西边界后形成黑潮, 黑潮

流域作为北太平洋的一支强西边界流,流速大于其他区域海表面流速,有一个明显的逆时针环流,黑潮的一个分支通过吕宋海峡入侵南中国海,主流流向继续向北,经过台湾岛之后,一部分入侵我国东海,一部分沿琉球群岛呈西北流向到日本的东南沿岸,之后与亲潮相遇在福岛东部附近的外海继续向东传播,两股冷暖的强流相遇之后形成了黑潮延伸体。黑潮和其延伸体的主流能够很好地在图中呈现,在黑潮延伸体的区域有明显的弯曲和槽脊。黑潮流经路线同 SODA 资料的对比也是相符的,由于 SODA 资料的分辨率没有模拟的结果精细,所以有些许涡旋在 SODA 资料中并没有而模拟结果中却有所呈现。通过与 SODA 资料的对比,可以看出模拟的结果和 SODA 资料的结果相似度很高,所以模拟的流场可以继续用于之后的模拟中。

在北太平洋表层环流中,黑潮和黑潮延伸体是一支非常强烈的西边界流,其对中国近海的影响也是比较大的。模式对其模拟的好坏会严重影响通过洋流进入中国各海区的核污染物浓度。图 3 给出了模式模拟出的 2009 年黑潮和黑潮延伸体的流场模拟图,从图中可以很明显看到黑潮和黑潮延伸体的流线,在黑潮和黑潮延伸体的区域的流速远远大于周围流速,并在 36°N 处附近从日本东岸分离,向东形成黑潮延伸体,这与实际的黑潮延伸体分离地点十分相近。黑潮的几个弯曲也同样模拟了出来,这说明在黑潮和黑潮延伸体的区域模拟的流场是可信的。

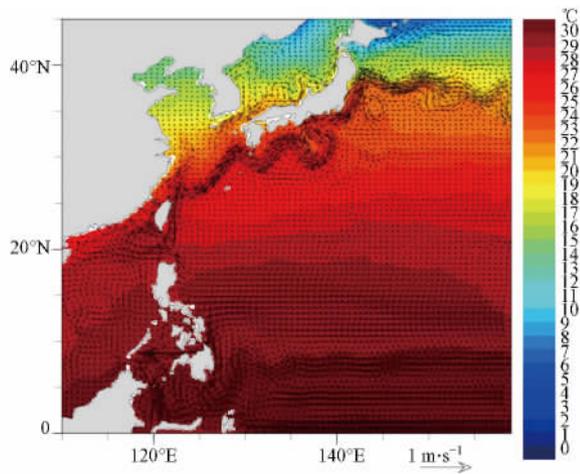


图 3 模拟 2009 年表层的黑潮和黑潮延伸体平均态

Fig.3 Mean state of the simulated Kuroshio and Kuroshio Extension in 2009

4 污染物扩散模拟结果(Results of the simulations of pollutant dispersion)

4.1 污染物分布与验证

福岛核电站释放出来的主要放射性污染物 ^{137}Cs 有近 30 年的半衰期,就说明在至少 30 年内能够持续影响放射性粒子所经过的地区,所以放射性污染物的运输扩散过程的模拟是十分重要的。模拟结果显示,在日本核泄漏之后,当本次事故排放的污染物尚未扩散到北太平洋中部时, ^{137}Cs 主要跟随黑潮延伸体的表层流,向东传播,在 2014 年夏季就可以到达北美地区的西海岸地区,之后一部分向北沿北美海岸线向白令海峡输运,另一部分集聚于美国加州西海岸并缓慢向南扩散。图 4 给出未考虑背景场(图 4a)和考虑背景场(图 4b) 2021 年 3 月月平均的表层的放射性粒子的试验结果分布图。从图 4a 和图 4b 上可以看出,核污染物浓度的大值区已经输运到了太平洋的东部,在北太平洋高纬度地区的影响也很大,污染物随着表层的流场输运到了高纬地区和太平洋东部地区;相较而言,日本海以及赤道地区核污染物浓度较小。核放射性污染物在北太平洋的主要扩散过程、大值区的位置与前人模拟的结果与结论大致相当(王辉等 2012)。

表 2 列出了 2012 年 1 月至 3 月考虑背景场以及未考虑背景场两种情况下核污染物浓度与 IAEA 观测资料的对比。从表中可以看出,未考虑背景场的情况下,很多观测有污染物浓度的地区在模拟中却仅为零,这说明可能海洋中本身就有一定量的核污染物浓度。这个浓度一方面是大气沉降进入的,而另一方面是海洋累积的人类活动所产生的核污染物浓度。而考虑到背景场浓度后,大值区的分布基本上与未考虑背景场的分布一致,但与观测数据符合程度大大提高,这证实了北太平洋中残留的背景场核污染物浓度与大气沉降仍占据一定的比例。此外,从表上可以看出,即便是同一地点、同一天但不同时刻的观测(如 2012 年 1 月 21 日和 22 日),其浓度也是有相当的差异。本文对比了本文模拟与 2011 年 6 月至 2012 年 9 月 IAEA 在整个北太平洋共 124 个不同时空观测点的数据,发现未加入背景场的模拟与实际相差的绝对值的平均值为 103.06%,相较之下,加入背景场以后,模拟的浓度与实际相差只有 27.58%,而平均下来同一地点同一日但不同时刻的观测资料大致相差 20.69%。并且考虑到加入背景场后模拟的平均 ^{137}Cs 放射性浓度只比观测值大

1.14% ,可以认为加入背景场后 ,模拟效果得到显著提高.

从图 4b 中可以看出 ,北美大陆西海岸地区 ,核污染物放射性浓度平均在 $2 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上.特别地 ,在白令海峡也存在大于 $2 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 的区域 ,这可能与本文设定白令海峡为闭边界 ,使得到达此处的核放射性污染物无法向北冰洋扩散有关.西北太平洋地区而言 ,其浓度低于东北太平洋地区.北太平洋在 40°N , 140°E 至 150°W 区域中存在一极小值区 ,浓度在 $1 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 附近 ,而在日本海更是接近 $0.6 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$; 在

30°N 附近 ,有一条自美国西海岸至台湾以东洋面的狭长的相对高浓度带 ,其浓度大致在 $1.3 \sim 1.4 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 附近.相较而言 ,中国各海区核污染物放射性浓度大致在 $1.2 \sim 1.3 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右 ,大致是北美中高纬沿岸浓度的 60% ,而未考虑背景污染物放射性浓度的情况下(图 4a) ,中国各海区的核污染物放射性浓度大致是北美西海岸的 20% 以下.由此可见 ,背景污染物放射性浓度对北太平洋 ,特别是中国各海区有着很大的影响.

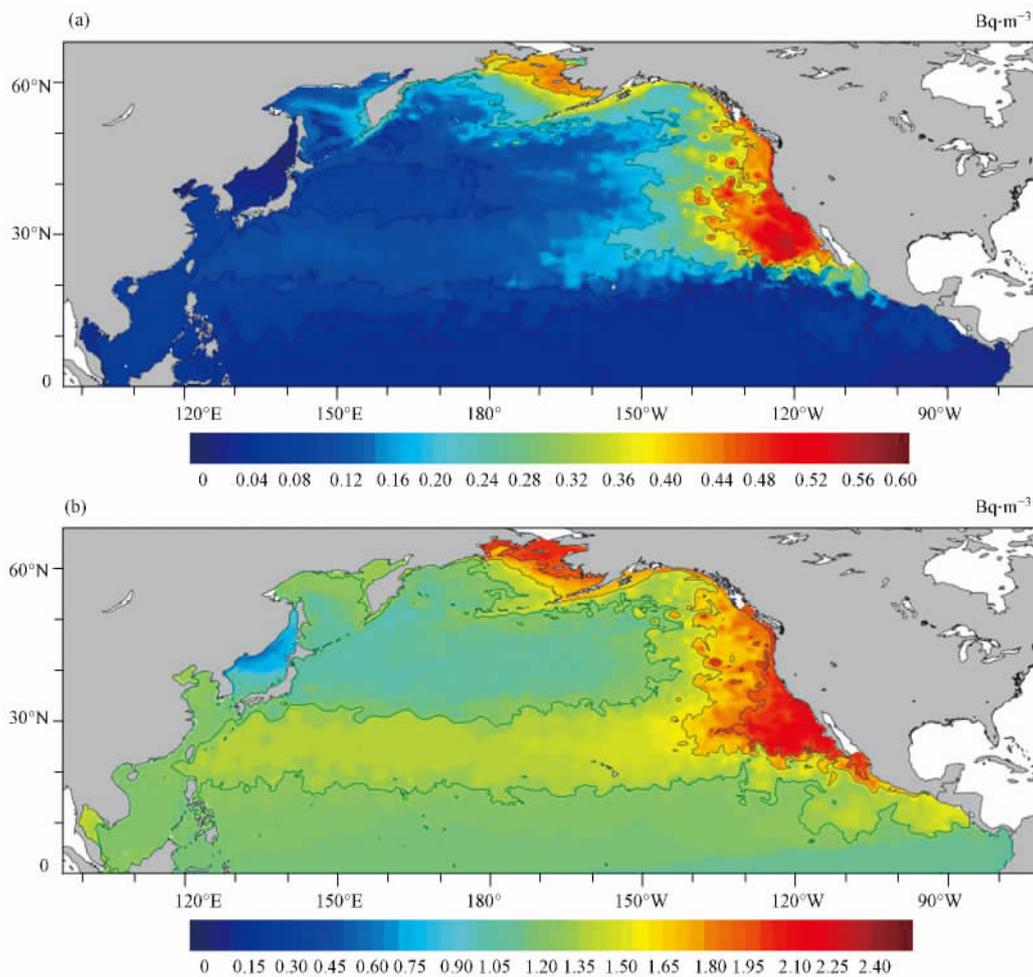


图 4 2021 年 3 月北太平洋表层核污染物水平分布的模拟结果 (a. 未加入背景场的情况 ,其中等值线为: $0.05, 0.1, 0.2, 0.4 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$; b. 加入背景场后的情况 ,其中等值线为: $1.3, 1.6, 1.9 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$)

Fig.4 Distributions of the simulated nuclear pollutant at the surface in North Pacific in Mar 2021 (a. without background field , contour lines: $0.05, 0.1, 0.2, 0.4 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$; b. with background field , contour lines: $1.3, 1.6, 1.9 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$)

如图 4 所示 ,从未考虑背景场污染物浓度的 2021 年 3 月的北太平洋表层核污染物水平分布上并不能看出中国海有明显的核放射性污染物 ,但考虑了背景场污染物浓度后 ,可以大致发现它们确实

存在于中国海区域.为了进一步了解它们如何影响到中国海 ,能够影响到中国海的哪些区域 ,我们选取了 2015 年 4 月中国海区域的月平均场来作进一步分析(图 5).图 5a 所示 ,即便不考虑背景场浓度 ,

在事件发生 4 年内,中国海大部就已经出现了放射性污染物,然而该放射性污染物浓度较低(不足 $0.2 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$),这与赵昌模拟的结论相近(赵昌等, 2014)。从不考虑背景场浓度的模拟可以说明,日本核泄漏排放的放射性污染物是完全可以由海洋运输的途径传输到中国,尽管传输的量相对于东太平洋地区非常少。虽然浓度没有北太平洋东部地区的浓度高,但是随着时间的推移,福岛核放射性物质会侵入中国海内部,甚至影响沿岸地区。因此福岛核事故泄漏出来的核放射性物质的最大值区虽然

处于北太平洋的东部地区,但是其影响范围为整个北太平洋区域,随着时间的推移和污染物的堆积,同样会对我国海域产生很大影响。虽然未加入背景场模拟的结果与前人相比略小(王辉等, 2012; 赵昌等, 2014),但前人是将大气沉降的污染物总量加入初始场,而本文初始场仅是考虑核泄漏事件中直接排入海洋的总量,而把大气沉降的量考虑在背景场之中,因此未考虑背景场浓度时,模拟浓度偏低是合理的。

表 2 IAEA 观测资料与添加背景场以及不添加背景场的模拟结果的对比(仅列 2012 年 1 月至 3 月)

Table 2 Comparison among observations, the results without and with background field (Jan. to Mar. in 2012)

时间	纬度 (°N)	经度(°E)	观测浓度/ ($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$)	不含背景场/ ($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$)	含背景场/ ($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$)
2012-01-03	22.11	191.46	1.6	0	1.49
2012-01-05	22.97	179.98	1.6	0	1.48
2012-01-21	34.45	130.08	1.7	0	1.22
2012-01-21	34.45	130.08	1.4	0	1.22
2012-01-22	32.53	132.98	1.6	0	1.34
2012-01-22	32.53	132.98	1.3	0	1.34
2012-01-29	26.89	182.06	1.6	0.01	1.75
2012-01-30	27.84	189.1	2.1	0	1.76
2012-01-31	32.98	197.06	1.7	4.08	2.55
2012-02-01	33.05	204.72	1.6	0	3.01
2012-02-02	34.26	213.1	2.0	0	1.69
2012-02-03	35.16	220.91	2.2	0	1.70
2012-02-04	48.99	219.18	1.3	0	1.41
2012-02-04	36.36	228.83	1.7	0	1.66
2012-02-05	47.53	228.13	1.4	0	1.41
2012-02-17	26.82	173.34	2.4	0.12	1.60
2012-02-24	32.29	206.67	1.6	0	4.08
2012-02-29	34.53	175.9	9.6	1.81	5.72
2012-03-02	33.42	196.11	2.1	1.61	2.18
2012-03-02	39.46	177.47	13.6	4.53	12.38
2012-03-04	30.09	211.27	1.7	0	1.58
2012-03-09	40.45	133.84	1.7	0	1.11
2012-03-16	31.92	223.18	1.6	0	1.71
2012-03-21	34.86	177.27	5.8	3.77	2.34

加入背景场后,可以发现,2015 年 4 月份,西太平洋地区核污染物浓度大于南海,南海略大于东海,黄海最低。而且南海和东海都是靠近黑潮一侧浓度较高,能达到 $1.6 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 。大体上可以推测,西太平洋受到大气沉降和海洋环流影响,核污染物浓度增高,通过黑潮在吕宋海峡的入侵向南海注入核放射性污染物。南海地区相对封闭,注入的核污染物很

难扩散,大部分集聚,沉淀于本地,因而浓度保持较高水平。南海一部分水体沿台湾海峡进入东海并与黑潮分支合并(有时仅是黑潮分支作用),形成台湾暖流,该暖流会将一部分核污染物带入东海,而黑潮主支穿过台湾以东洋面,沿大陆架流动,并于托克拉海峡流出,带走部分核污染物,因而大致推测东海核污染物浓度大致主要是台湾暖流带入的。黄

海离西太平洋较远,且受黑潮影响东面对马海峡多为向东的洋流,能够带走黄海内部的污染物,因此浓度反而是最低的.

4.2 各水道通量计算

为了进一步分析核放射性物质是从哪些水道进入中国海域,本文分别计算了考虑了背景场浓度后巴拉巴克海峡、吕宋海峡、台湾海峡、台湾以东至与那国町洋面、石垣岛至那霸、那霸至奄美岛、托克拉海峡以及对马海峡(位置见图5)这几个西北太平洋与中国海连接的水道核放射性污染物通量的时间序列(图6),通过对这几个水道的核放射性污染物通量的计算和分析,本文能够进一步发现核放射性物质是从什么位置进出中国海,也能知道进出中国海的核放射性物质的主要通道和以及对中国海域影响.

巴拉巴克海峡位于南中国海的东南部是苏禄海和南中国海之间进行物质交换的重要水道之一,此海峡水深较浅,深度为150 m左右,而南中国海和苏禄海最深处分别为5567 m和5600 m,且二者均接近于一个封闭海区,因而之前并没有学者指出有核放射性污染物从此海峡运输到南中国海.但是如图6a所示,通过巴拉巴克海峡的核放射性污染物通量有着较为明显的季节变化,冬半年从南中国海运输到苏禄海,夏半年又苏禄海反向运输给南中国海.全年平均而言,基本上以南中国海向苏禄海运输为主,但从2016年开始冬半年从南中国海运输到苏禄海的通量减少,而夏半年基本维持不变,使得从2018年开始全年平均运输总量大致为0,且有着苏禄海反向运输给南中国海的趋势.

不同于巴拉巴克海峡,同样与南中国海有很大物质交换的重要水道吕宋海峡则深度为2400 m左右,其宽度也远远大于巴拉巴克海峡,所以吕宋海峡的计算结果(图6b)表明通过吕宋海峡的核放射性污染物大部分时间内的运输方向为向南中国海运输并在2017年冬季达到峰值.注意到吕宋海峡的海流不是一致的,在表层,南部以西向流为主,北部以东向流为主,而到深层流速在经向上反转,南部以东向流为主,北部以西向流为主,且在模拟中也反映出了这种流场结构.这种不一致减少了从吕宋海峡侵入到南中国海的水团及其所携带的污染物,但由于总体而言,吕宋海峡的流向是以侵入南中国海的自东向西流为主,且水流量也远远大于巴拉巴克海峡,所以运输的核放射性污染物通量的量级也

要大于巴拉巴克海峡,所以进入南中国海的核放射性物质大部分是通过吕宋海峡,小部分通过巴拉巴克海峡入侵的.由于南中国海是一个基本封闭的海域,通过这两个海峡的主要运输,使南中国海南北都有核放射性污染物运输,进入南中国海的核放射性污染物很难流出,大多只能等待核放射性污染物自行衰变.

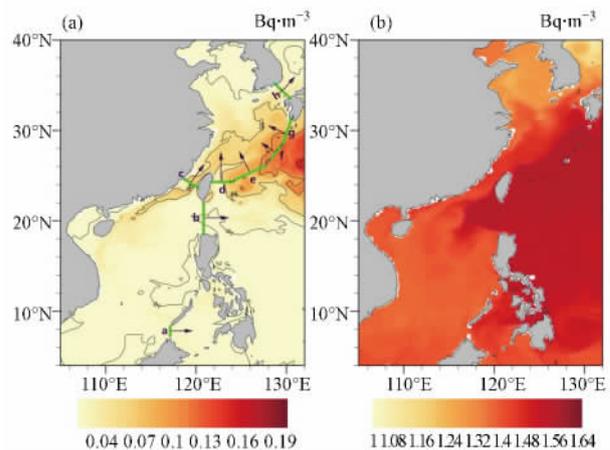


图5 2015年4月中国海区域表层核污染物的模拟分布特征,(a)是未加入背景场的结果,等值线为0.01,0.05,0.1,0.15 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$;(b)是加入后的结果,其中(a)中a~h分别代表文中计算通量的位置(a.巴拉巴克海峡;b.吕宋海峡;c.台湾海峡;d.台湾以东至与那国町洋面;e.石垣岛至那霸;f.那霸至奄美岛;g.托克拉海峡;h.对马海峡),并且定义箭头方向为通量的正方向

Fig.5 Distributions of the simulated nuclear pollutant at the surface in China Sea in Apr. 2015. (a) Without background field (contourlines: 0.01, 0.05, 0.1, 0.15 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$); (b) with background field. Arrows marked in (a) indicate the positions where the fluxes are calculated, and directions of the arrows define the positive direction of the flux (a. Balabac Strait; b. Luzon Strait; c. Taiwan Strait; d. east of Taiwan; e. Ishigaki to Naha; f. Naha to Amami; g. Tokar Strait; h. Tsushima Strait)

台湾海峡和台湾以东洋面为黑潮入侵东中国海的主要通道,台湾海峡的深度为150 m,台湾以东洋面的深度为1000 m.从图6c、图6d可以看出,二者虽然有季节变化,但始终是从南中国海和西太平洋向东中国海输送污染物,平均在 $2.503\times 10^6 \text{ Bq}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $3.161\times 10^7 \text{ Bq}\cdot\text{s}^{-1}$.注意到台湾以东洋面的核放射性污染物通量是台湾海峡的一个量级以上,基本上认为黑潮是入侵东中国海的主要通道.但考虑到黑潮进入东中国海后主支沿东中国海外围流动,只有小部分会与台湾海峡的北进流汇合形成台湾暖流

深入至中国近海, 而绝大部分会沿着外陆架直至托克拉海峡流出, 因而深入至中国近海的核污染物通量可能只有黑潮携带的一小部分.

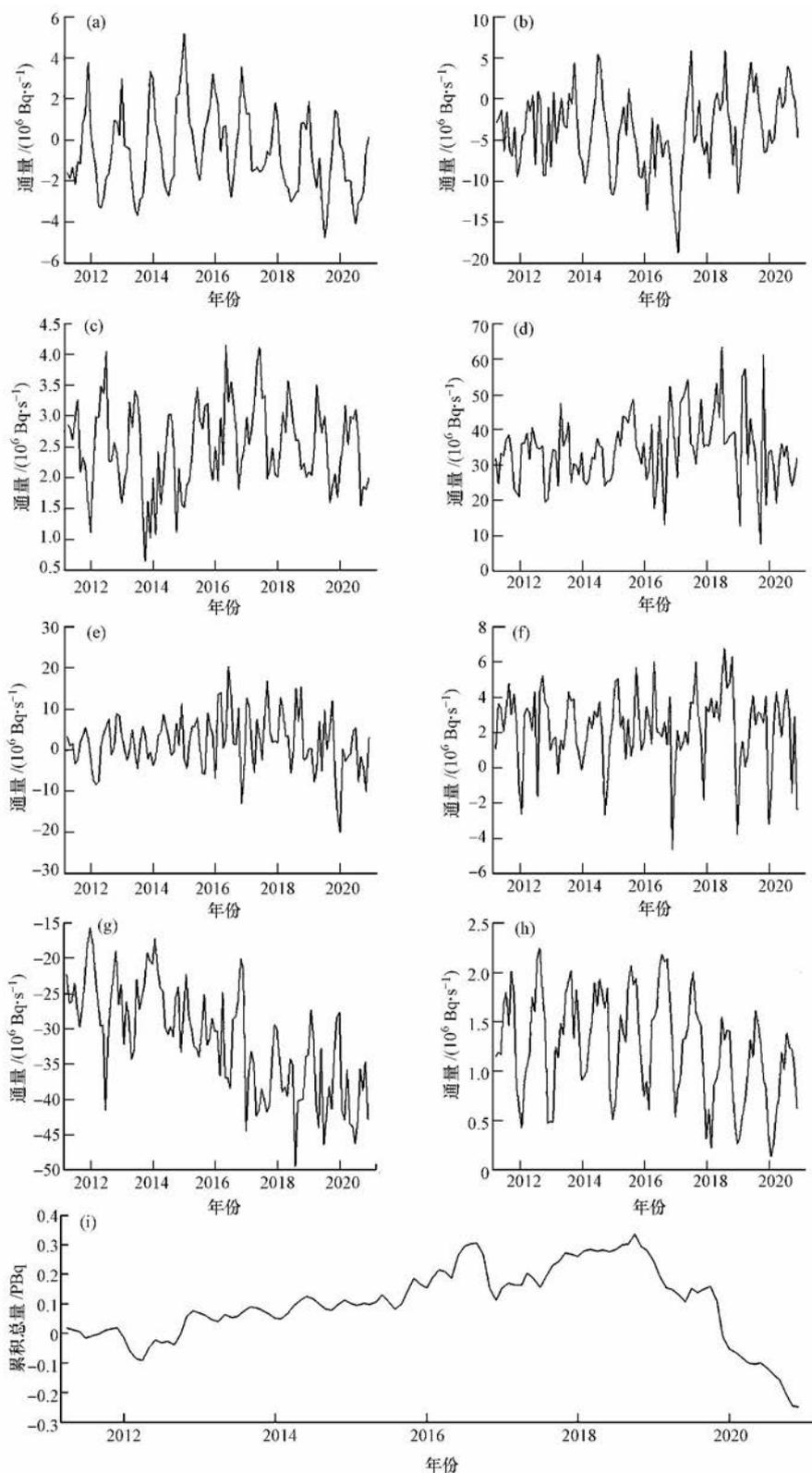


图 6 核污染物通过不同通道(图 5a 所示)的通量的时间序列(a~h; 单位: 10⁶ Bq·s⁻¹; 正值表示沿箭头方向, 负值则相反, 具体参考图 5), 以及在东中国海的累积总量的时间演变(i; 单位: PBq).

Fig.6 Time-series of fluxes of the nuclear pollutant across the eight passages (a~h) indicated in Fig. 5a (a~h; Unit: 10⁶ Bq·s⁻¹, positive values represent fluxes along arrows), and the total accumulation of nuclear pollutant in East China Sea (i; Unit: PBq)

石垣岛至那霸(图 6e) 以及那霸至奄美岛(图 6f) 是大致与黑潮平行的两段, 为黑潮入侵东中国海的重要部分, 也是东中国海与北太平洋的主要交换水道之一。此处水深较深, 深度为 1500 m, 大量的黑潮水携带着核放射性污染物从该水道与东中国海进行交换, 流速虽大, 但是由于与黑潮路径基本平行, 因此在该处的平均核污染物流量通量($1.907 \times 10^6 \text{ Bq} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $2.250 \times 10^6 \text{ Bq} \cdot \text{s}^{-1}$) 与托克拉海峡以及台湾以东洋面相比要小一个量级。

除此之外, 位于朝鲜半岛与日本之间对马海峡(图 6g) 和日本南部的托克拉海峡(图 6h) 的核放射性污染物通量以从东中国海向日本海、西太平洋的输运为主, 说明进入东中国海的核放射性污染物有着通过其他途径进行向外输运。由于对马海峡水深只有 120 m 左右, 通过对马海峡的水流量主要是黑潮的分支, 流速较小, 因此每年通过的水流量不是很大, 从对马海峡向日本海输运的核放射性污染物并不多。托克拉海峡水深 350 m, 是对马海峡的 2 倍, 而且位于黑潮主支上, 流速比对马海峡大得多, 因而通过托克拉海峡, 能够输运较多的核放射性污染物(前者 $1.245 \times 10^6 \text{ Bq} \cdot \text{s}^{-1}$, 而后者 $3.165 \times 10^7 \text{ Bq} \cdot \text{s}^{-1}$) 到日本以东洋面。特别注意到, 从托克拉海峡流出的核放射性污染物的量级、大小与从台湾以东洋面流入的量级、大小相当, 说明黑潮主支携带的大部分核放射性污染物未进入东中国海近海, 而是沿东中国海外围大陆架离开, 并且从托克拉海峡流出程度核污染物通量逐渐增加, 从 2011 年的 $2.3 \times 10^7 \text{ Bq} \cdot \text{s}^{-1}$ 至 2019 年 $3.9 \times 10^7 \text{ Bq} \cdot \text{s}^{-1}$, 并随后大致保持不变。通过这两个海峡, 有大量的核放射性污染物从东中国海被输运向其他海域, 减缓了东中国海的污染程度。此外, 对马海峡和托克拉海峡的核放射性污染物通量都有着冬季弱夏季强的季节变化特征, 这与黑潮的季节变化是一致的。

图 6i 是对 2011 年 4 月至 2020 年 12 月的进出东中国海的通道的通量(c~h) 进行累积求和。可以看出, 在 2013 年之前, 进出东中国海的累积总量基本为 0, 而之后至 2019 年, 从台湾以东洋面进入的核污染物通量开始缓慢上升, 累积总量大体上稳步上升(在 2017 年前有小幅下降), 在 2019 年初达到最大, 为 0.33 PBq, 随后由于流出的核污染物保持在略大于流入的通量水平(主要是从托克拉流出的通量略大于从台湾以东洋面进入的通量), 累积总量开始减小, 在 2020 年初恢复至日本核泄漏之前水

平, 并继续下降。这表明了即便不考虑核放射性污染物自身衰减, 2020 年以后, 东中国海的核污染物平均浓度也将低于日本核泄漏之前的平均浓度。

4.3 对中国沿海城市影响

从上述结果中我们得知, 每年进出南中国海、东中国海的核放射性污染物总通量都很大, 考虑到中国沿海城市众多, 若核放射性污染物侵入中国近海, 首先会对沿岸地区产生影响, 使沿岸地区的核放射性污染物的浓度高于其他地区。从图 6 中可以看出, 各个通量的季节变化很大, 有着很明显的年周期, 且在 2017 至 2019 年核污染物累计总量达到峰值。因此, 本文选取纬度在 $15^{\circ} \text{N} \sim 40^{\circ} \text{N}$, 经度在 $116^{\circ} \text{E} \sim 132^{\circ} \text{E}$ 的区域, 以 2017 年 1 月、4 月、7 月、10 月平均为代表来分析不同季节下, 中国近海核放射性污染物的表层分布特征。

首先, 关注南中国海北部地区。冬春季黑潮在吕宋海峡主要是流套形式侵入南中国海, 有的时候甚至会出现甩涡过程, 核污染物随着黑潮穿过吕宋海峡侵入南中国海北部, 使得台湾西部、福建、广东以及海南先后受到核污染物的影响。而到了夏季, 黑潮在吕宋海峡主要是跨隙的流态, 此时南中国海的核污染物浓度主要是前期黑潮侵入携带的核污染物以及少量从吕宋海峡进入的核污染物所维持。从图 7 中可以看到台湾地区存在的三支流——存在于台湾海峡西岸的闽浙沿岸流、存在于台湾海峡中西部的南海暖流的延伸流和入侵台湾海峡东部的穿过吕宋海峡的黑潮分支。台湾西岸的核污染物随台湾暖流北上, 广东海南则向西向南扩散。从夏末(9 月) 开始至冬初(1 月) 东海沿岸流受偏北风强迫向南输运(鲍献文等, 2005), 将低核污染物浓度的海水输送到华南沿海地区, 使华南沿海地区, 特别是沿岸地区, 核污染物浓度降低。

其次, 关注东中国海地区。整体而言, 东中国海的核放射性污染物浓度呈现出东南高北部低。在中国东部沿岸上, 表层的核放射性污染物浓度有着季节性变化。侵入中国沿岸的东中国海核污染物主要是在春季顺着黑潮分支和台湾海峡中西部的南海暖流共同构成的台湾暖流向浙江、福建沿海运输, 夏季到达长江口, 继续运输至江苏沿岸, 此时与南向的黄海沿岸流相交, 使得核污染物不能继续北上, 只能驻留在江苏沿岸, 这使得江苏沿岸的核污染物一直维持着高于东中国海同纬度非沿岸地区一定的水平。总体而言, 西太平洋大部分核污染物是

顺着黑潮主干沿东中国海大陆架通过对马海峡和托克拉海峡,并没有进一步侵入东中国海内部,从

而在黑潮北侧有着较大的浓度梯度。

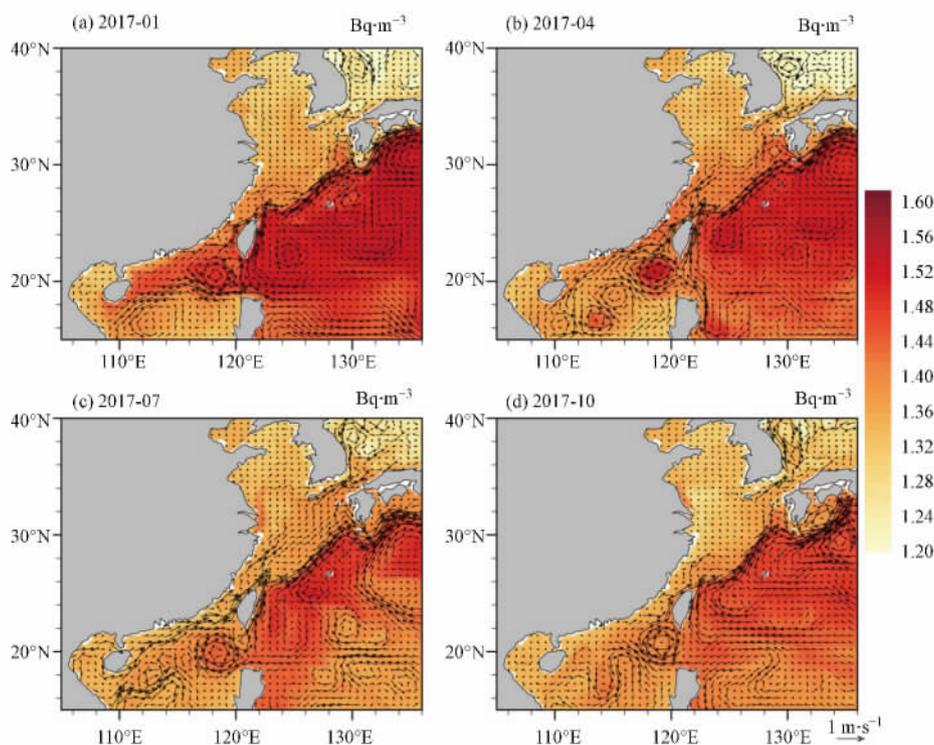


图7 2017年东中国海以及南中国海北部表层核污染物浓度的月平均水平分布模拟

Fig.7 Distributions of simulated monthly mean surface pollutant concentration in China Sea in 2017

5 结论与讨论(Conclusion and discussion)

本文针对2011年3月11日由日本东方外海地震和海啸引发的福岛核电站放射性物质泄漏事件,使用ROMS区域海洋模式的Agrif的V3.1.1版本,采用NCEP日均资料以及GFDL的预测资料作为强迫场,以2001年1月1日的HYCOM资料作为初始场,积分计算至2021年12月31日.其中,在2011年4月1日加入客观分析得到的背景场以及此次事故中从福岛核电站中泄漏出来的核放射性物质,从而对核放射性物质的输运路径以及输运过程中浓度的变化、核放射性物质在中国各外海海区的通量以及对中国沿海地区的影响等方面进行了研究分析.本文得到以下主要结论:

1) 利用已有的观测资料进行简单的客观分析,能够计算出一个较为理想的背景场,并将该背景场与本次模拟的假设的泄漏量进行资料同化,可以大大提高模拟与实际的接近程度.

2) 无论是考虑了背景场还是未考虑背景场的模拟结果均显示,核放射性物质随着流场输运,大

值区向东输运,到达北美西岸之后,沿岸向南北方向继续扩散,向北能够到达白令海峡,向南到达赤道地区.未考虑背景场的模拟分析结果表明,本文得到福岛核事故释放出的核放射性物质能够通过海洋输运途径输运在4年内到达几乎整个东、南中国海.同时,未考虑背景场的模拟还突出了一小部分核放射性物质随着海流向西南方输运,能够到达西北太平洋中低纬度地区,从而影响我国海域.模拟到2021年3月时,几乎整个北太平洋都有核放射性物质,在整个北美大陆西海岸沿岸地区以及白令海峡附近有较高的浓度,中国海域也都分布着核物质,放射性浓度较低,大体上不足 $0.05 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$.

3) 尽管考虑了背景场核放射性污染物浓度后,中国近海表层的核污染物即 ^{137}Cs 放射性浓度在2015年夏季在东中国海南部能达到 $1.6 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$,而在10年后,也就是2021年仍旧保持在 $1.3 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 附近(远高于前人的结论),但仍旧远远不及国家规定的 $10 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$ ($10000 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$)的海水安全标准,更不用说能否达到放射性物质和源的豁免水平 $0.1 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ (以水的质量换算即为 $100000 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$)(环

境保护部, 2012)。因此, 日本福岛核泄漏后, 中国各海区核放射性污染物浓度虽有上升, 但与国家安全标准相比是微不足道的, 至少从现有的模拟结果上来看确是如此。

4) 在考虑了背景场的模拟结果中, 对中国各海区核污染物输送影响最大的台湾以东洋面、托克拉海峡和吕宋海峡, 三者的量级均达到了 $10^7 \text{ Bq} \cdot \text{s}^{-1}$ 。其中吕宋海峡和台湾以东洋面分别是核污染物侵入南中国海和东中国海通量最大的地方, 而托克拉海峡则是带走核污染物通量最大的地方。石垣岛至那霸虽然部分单月通量的量级均达到了 $10^7 \text{ Bq} \cdot \text{s}^{-1}$, 但其污染物通量常常以正负交替, 平均通量只有台湾海峡的大小。

5) 由于近乎封闭的地理条件, 南中国海基本无法把核放射性污染物通过洋流输运到其他海域, 只能等待核放射性污染物自行衰变减弱。东中国海通过对马海峡、托克拉海峡等海峡的输运, 还是可以输运走一些核放射性污染物, 其运输的总量和黑潮入侵的总量相当, 在 2015 年之前, 自托克拉海峡流出的核污染物速率(大致 $2.5 \times 10^7 \text{ Bq} \cdot \text{s}^{-1}$) 略小于黑潮入侵速率(大致 $3 \times 10^7 \text{ Bq} \cdot \text{s}^{-1}$)。东中国海积累的核污染物总量在 2017 至 2019 年初达到峰值, 为 0.33 PBq。之后东中国海累积的核污染物总量下降, 至 2020 年, 累积的核污染总量为负, 表明即便不考虑核放射性污染物自身衰减, 2020 年以后, 东中国海的核污染物平均浓度也将低于日本核泄漏之前的平均浓度。

6) 在未考虑径流的情况下, 中国东部沿海的核放射性污染物浓度分布均有着明显的季节特征。华南沿海冬春核污染物浓度高于夏秋两季, 而华东沿海则相反。影响华南沿海污染物浓度主要因素是吕宋海峡流套结构的入侵, 而华东则是台湾暖流的北进。北进的台湾暖流最北能到达江苏沿岸, 使得江苏沿岸的核污染物一直维持着高于东中国海同纬度非沿岸地区一定的水平。

由于本文使用的核放射性污染物的排放量数据是根据多篇文献的保守估计, 并且假设是在 2011 年 4 月 1 日全部释放, 从 IAEA 的资料上来看, 日本核泄漏持续了一定长的时间, 因此与实际会有所偏差。此外, 背景场仅是利用简单的客观分析得到的, 虽然与观测资料对比结果比较理想, 但是用来检验的观测点很少, 且可能代表性不足。同时本文在模拟时使用的是 $1/8^\circ$ 精度的模拟, 在模拟中还有很多中

小尺度流场是无法模拟出来的, 模拟时边界采用闭边界, 未考虑白令海峡与北冰洋的通量、越赤道流、潮汐以及河流对结果的影响, 未来的预测场的强迫条件采用 GFDL 的预测资料, 这些都会给模拟结果带来一定的不确定性。除此之外, 计算通量与累计总量时采用的是模式输出的月平均资料, 会有一些偏差。我们将会在未来的研究对以上问题做进一步完善。

参考文献(References):

- 鲍献文, 林霄沛, 吴德星, 等. 2005. 东海陆架环流季节变化的模拟与分析[J]. 中国海洋大学学报, 35(3): 349-356
- Bois P B D, Laguionie P, Boust D, *et al.* 2012. Estimation of marine source-term following Fukushima Dai-ichi accident [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 114: 2-9
- Bruneau N, Bonneton P, Castelle B, *et al.* 2011. Modeling rip current circulations and vorticity in a high-energy mesotidal-macrotidal environment [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116 (C7): C07026
- Buesseler K, Aoyama M, Fukasawa M. 2011. Impacts of the Fukushima nuclear power plants on marine radioactivity [J]. *Environmental Science & Technology*, 45(23): 9931-9935
- 程卫亚, 杨宏伟, 陈凌, 等. 2012. 利用航测数据反推福岛核事故 ^{137}Cs 的释放量[J]. 原子能科学技术, 46(2): 252-256
- Chino M, Nakayama H, Nagai H, *et al.* 2011. Preliminary estimation of release amounts of ^{131}I and ^{137}Cs accidentally discharged from the Fukushima Daiichi nuclear power plant into the atmosphere [J]. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 48(7): 1129-1134
- Dong C M, Lin X Y, Liu Y, *et al.* 2012. Three-dimensional oceanic eddy analysis in the Southern California Bight from a numerical product [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117 (C7): C00H14
- 何晏春, 郜永祺, 王会军, 等. 2012. 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, 34(4): 12-20
- Hirose K. 2012. 2011 Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident: summary of regional radioactive deposition monitoring results [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 111: 13-17
- 环境保护部. 2012. 国家污染物环境健康风险名录: 物理分册[M]. 北京: 中国环境科学出版社. 105-107
- Inoue M, Kofuji H, Nagao S, *et al.* 2012. Lateral variation of ^{134}Cs and ^{137}Cs concentrations in surface seawater in and around the Japan Sea after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 109: 45-51
- Kanai Y. 2012. Monitoring of aerosols in Tsukuba after Fukushima Nuclear Power Plant incident in 2011 [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 111: 33-37
- Katata G, Ota M, Terada H, *et al.* 2012. Atmospheric discharge and dispersion of radionuclides during the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. Part I: Source term estimation and local-scale atmospheric dispersion in early phase of the accident [J]. *Journal of*

- Environmental Radioactivity, 109: 103-113
- Liang X S. 2002. Wavelet-based multiscale window transform and energy and vorticity analysis [M]. Harvard Reports in Physical / Interdisciplinary Ocean Science, Rep. No. 66, Harvard University, Cambridge, MA. 411.
- MEXT, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, 2012. 平成 24 年版科学技术白書 [OL] http://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/html/hpaa201201/detail/1322695.htm
- 聂新旺, 王益柏, 孙守勋, 等. 2012. 应用 Models-3/CMAQ 对 2011 年 3 月日本福岛核泄漏的数值研究[J]. 气象, 38(10): 1182-1188
- Penven P, Cambon G, Marchesiello P, et al. 2010. ROMSTOOLS User's Guide [OL]. <http://www.romsagrif.org/index.php/documentation/ROMSTOOLS-Documentation>
- Povinec P P, Gera M, Holý K, et al. 2013. Dispersion of Fukushima radionuclides in the global atmosphere and the ocean [J]. Applied Radiation and Isotopes, 81: 383-392
- 乔方利, 王关锁, 赵伟, 等. 2011. 2011 年 3 月日本福岛核泄漏物质运输扩散路径的情景模拟和预测 [J]. 科学通报, 56(12): 887-894
- Shchepetkin A F, McWilliams J C. 2005. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate ocean model [J]. Ocean Modelling, 9(4): 347-404
- Stohl A, Seibert P, Wotawa G, et al. 2012. 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 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 12(5): 2313-2343
- Tsumune D, Aoyama M, Hirose K. 2003. Behavior of ^{137}Cs concentrations in the North Pacific in an ocean general circulation model [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 108(C8): 3262
- Tsumune D, Tsubono T, Aoyama M, et al. 2012. Distribution of oceanic ^{137}Cs from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant simulated numerically by a regional ocean model [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 111: 100-108
- 万恩源, 郑向东, 万国江, 等. 2012. 2011 年春季日本福岛核泄漏污染输送: 贵阳 ^{131}I 和 ^{137}Cs 观测示踪分析 [J]. 环境科学学报, 32(9): 2182-2188
- 王辉, 王兆毅, 朱学明, 等. 2012. 日本福岛放射性污染物在北太平洋海水中的运输模拟与预测 [J]. 科学通报, 57(22): 2111-2118
- 王蕾, 郑国栋, 赵顺平, 等. 2012. 日本福岛核事故对我国大陆环境影响 [J]. 辐射防护, 32(6): 325-335; 347
- Wang X C, Chao Y, Zhang H C, et al. 2013. Modeling tides and their influence on the circulation in Prince William Sound, Alaska [J]. Continental Shelf Research, 63: S126-S137
- 吴俊文, 周宽波, 戴民汉. 2012. 从人为放射性核素 ^{137}Cs 看福岛核事故对中国海的影响 [J]. 科学通报, 57(32): 3100-3108
- 张文杰, 徐义生, 徐峻, 等. 2013. 日本核泄漏对我国北方典型区域的影响 [J]. 环境科学研究, 26(3): 274-280
- 赵昌, 乔方利, 王关锁, 等. 2014. 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, 59(34): 3416-3423
- 赵昌, 乔方利, 王关锁, 等. 2015. 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, 37(3): 15-24