

# 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

乔方利, 王关锁, 赵伟, 赵杰臣, 戴德君, 宋亚娟, 宋振亚

国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061

E-mail: qiaofl@fio.org.cn

2011-03-23 收稿, 2011-04-09 接受

国家重点基础研究发展计划(2010CB950303)和国家自然科学基金重点项目(40730842)资助

**摘要** 2011年3月受日本以东地震和海啸影响, 日本福岛核电站发生核物质泄漏. 本文提出泄漏物质自然输运的3种通道: 大气快速输运通道、海洋表层慢速输运通道和海洋内部极慢速输运通道. 基于短期气候预测模式和海洋环流数值模式, 在理想假设条件下, 对核泄漏物质的输运扩散路径进行了情景模拟和预测. 结果显示: 若泄漏源设置在近地层 992 hPa, 10 d后影响范围可达北美大部地区, 但浓度比所设置的源区浓度低约6个量级, 15 d后可影响到欧洲, 20 d后前锋进入中国西部地区, 30 d后则布满整个纬带; 若泄漏源在5 km高度, 泄漏10 d后影响范围可覆盖欧洲, 15 d即可布满整个纬带; 若泄漏源在10 km高度, 10 d后即可影响中国大部分区域. 核泄漏物质通过海洋表层通道向东输运则缓慢得多, 50 d后到达150°E左右, 且影响范围仅在一条狭窄条带内. 大气通道影响范围巨大, 甚至可到达赤道海域上空, 但核泄漏物质的浓度很快降低. 大气环流上游如北美和欧洲的大气质量监测结果对中国具有重要的参考价值.

## 关键词

核泄漏  
输运扩散  
大气和海洋通道  
预测

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130 km处(38.0°N, 142.9°E)海底发生9.0级地震, 震源深度10 km. 随后该地震引发的高达10 m海啸袭击了日本东部沿海地区. 日本福岛核电站(37.42°N, 141.03°E)地处日本福岛工业区, 是目前世界上最大的核电站. 受此次地震和海啸的影响, 日本福岛核电站遭受重创, 引发核泄漏. 3月12日1号反应堆发生爆炸, 据报道推测70%的燃料棒受损; 3月14日由于反应堆温度升高导致3号反应堆发生爆炸; 3月15日2号反应堆爆炸, 30%的燃料棒可能受损; 4号反应堆继15号爆炸后16号又发生火情, 4号反应堆的爆炸导致外墙出现破损, 使得储存乏燃料棒的水池暴露在大气中. 核泄漏物质会随大气和海洋的运动而运移和扩散, 其影响范围是一个

亟待回答的科学问题. 国家气象中心早在20世纪90年代后期就建设了核污染物长距离传输的全球大气环境业务数值预报系统, 2007年又建立了区域大气环境应急响应模式系统<sup>[1]</sup>. 利用当今改进的短期气候预测模式开展情景模拟和预测, 依然有其迫切性和必要性.

核泄漏物质的输运扩散存在3类自然通道: 大气中随气流的快速输运通道、海洋表层随海流的慢速输运通道以及海洋内部的极慢速输运通道. 除此之外, 也存在人类活动(如船舶、飞行器)等输运通道. 相比于自然通道, 人类活动的输运通道非常微弱, 但不排除对局部区域造成影响. 由于海洋内部通道输运速度极慢, 需要数年甚至数十年才能具有明显长程输运效果, 因此本文重点讨论大气通道和海洋表层

通道.

大气和海洋数值模式是定量化评估核泄漏物质输运扩散路径的重要手段. 针对此次核泄漏事件, 联合国全面禁止核试验条约组织(<http://www.nytimes.com/interactive/2011/03/16/science/plume-graphic.html?ref=science>)、比利时高空物理研究所([http://aeronomie.be/multimedia/video/daiichi3-washout\\_bira-iasb\\_animated.gif](http://aeronomie.be/multimedia/video/daiichi3-washout_bira-iasb_animated.gif))、芬兰气象局(<http://en.ilmatieteenlaitos.fi/japan>)、挪威大气研究所(<http://transport.nilu.no/products/fukushima>)、德国气象局(<http://www.dwd.de/>)、马里兰大学(<http://209.157.64.200/focus/f-news/2692551/posts>)和国际原子能机构(<http://blog.alexanderhiggins.com/net2/japan-nuclear-plume-radiation-map.aspx>)等利用数值模拟手段开展了3~7 d的核泄漏物质输运的预测工作. 由于目前气象预报仅提供3~7 d预报, 不能满足本文开展3个月数值预测的要求. 我们利用改进的气候模式进行未来3个月的大气要素预测. 虽然短期气候预测仍然是具有相当难度的科学问题<sup>[2]</sup>, 且预测结果存在一定误差, 但仍可以用来作为短期气候预测的核心工具. 美国 NCAR 气候模式 CCSM3<sup>[3-7]</sup>是被世界气候学者广泛使用的气候模式, 也是参加 CMIP3 实验的近 20 个气候系统模式中性能最好的模式之一<sup>[8]</sup>. 虽然该模式存在热带偏差<sup>[3,9]</sup>等气候模式的共性问题, 但引入浪致混合过程<sup>[10]</sup>后东太平洋虚假海表温度的模拟问题得到显著改善<sup>[11]</sup>, 海洋短期气候现象(如厄尔尼诺)的预测能力也得到提高<sup>[12]</sup>. 本文利用改进的 CCSM3 气候模式进行了 2011 年 3 月 14 日~6 月 13 日共 3 个月的预测, 以评估核泄漏物质在大气通道中的输运扩散过程及影响范围, 同时作为海洋数值模式的上边界强迫条件.

基于气象强迫场, 利用海洋环流数值模式可以模拟预测核泄漏物质在海洋表层和内部的输运过程. 我们所发展的浪致混合理论<sup>[10]</sup>能够显著提高全球和近海环流数值模式对上层海洋的模拟能力<sup>[13-15]</sup>. 利用所建立的海浪-潮流-环流耦合数值模式, 研究了我国近海的环流结构, 提出黄海夏季锋面上升流的新机制<sup>[13]</sup>, 分析了 2008 年青岛外海下沉浒苔分布与流场辐聚辐散的动力学关系<sup>[16]</sup>, 并准确预测了 2010 年黄海浒苔的漂移趋势<sup>[17]</sup>.

日本福岛以东海域存在黑潮延伸体和亲潮两支相互作用的强流. 在此区域, 冬季表层海水冷却下沉, 是太平洋西部模态水的一个重要源区<sup>[18]</sup>. 低位涡的

太平洋西部模态水潜沉至约 300 m 深度在大洋内部长程输运, 但输运速度很慢, 据估计从该区域下沉运动到台湾以东海域约需 12 年<sup>[19]</sup>. 此次核泄漏发生在 3 月, 表层水体冷却下沉的条件不充分, 核泄漏物质应该不会大量下沉; 即使有少量下沉, 其运移速度很慢, 因此本文不再开展海洋内部通道的模拟与预测.

## 1 数值模式和实验设计

### 1.1 气候数值模式与实验设计

气候预测采用改进的 CCSM3 气候预测模式<sup>[12]</sup>, 其大气模式采用 NCAR 研发的 CAM3.0(Community Atmosphere Model Version 3.0)<sup>[4]</sup>, 水平分辨率是 T42(约  $2.8^\circ \times 2.8^\circ$ ), 垂直方向分为 26 层. CAM3.0 对于东亚季风区气候的模拟能力已经得到检验<sup>[20]</sup>.

气候模式冷启动运行 300 年, 使模式基本达到稳定状态; 自 1982 年 1 月 1 日起该气候模式采用逐日 SST<sup>[21]</sup>进行同化<sup>[12]</sup>至 2011 年 3 月 14 日. 从 2011 年 3 月 14 日开始启动未来 3 个月的短期气候预测, 同时进行核泄漏物质的输运扩散模拟. 分别在大气环流模式近地层 992 hPa(数值模式中最接近地面的大气层)、5 和 10 km 处的一个格点一次性放置单位浓度的示踪物. 本预测采用的是 CAM3.0 中的示踪物输运扩散模块<sup>[4]</sup>, 该模块不考虑核泄漏物质自身衰减及其在大气中的沉降等过程. 并将预测气象场输出作为海洋环流模式的驱动. 沿垂直方向积分模式各层核泄漏物质浓度以获取其平均的浓度, 选取全场最高浓度的 10% 作为核泄漏物质的影响范围.

考虑到不同泄漏时刻影响范围不同, 将核泄漏时间分别假定为 2011 年 2 月 14 日和 1 月 14 日, 进行情景数值实验以探讨影响范围与大气环流场的关系.

### 1.2 海洋环流数值模式与实验设计

考虑到气候模式中的全球海洋环流模式分辨率低, 本研究采用高分辨率的西北太平洋区域海洋环流数值模式. 该模式为已经业务化运行的 MASNUM 海浪-潮流-环流耦合数值预报系统中的西北太平洋海域预报模块<sup>[22]</sup>, 其中环流模式采用美国普林斯顿海洋数值模式(Princeton Ocean Model)<sup>[23,24]</sup>, 海浪模式采用 MASNUM 海浪数值模式<sup>[25,26]</sup>. 模式区域为 ( $0^\circ \sim 50^\circ \text{N}$ ,  $99^\circ \sim 150^\circ \text{E}$ ), 空间分辨率为  $(1/8)^\circ \times (1/8)^\circ$ ,

环流模式垂向分为 21 层. 环流模式的开边界条件由水平分辨率为  $(1/2)^\circ \times (1/2)^\circ$  全球模式嵌套得到<sup>[23]</sup>, 2011 年 3 月 14 日之前的气象强迫场采用 6 h 分辨率的 NCEP/NCAR 再分析数据, 2011 年 3 月 14 日至 6 月 13 日的气象强迫场由上述的气候预测模式提供. 经检查, 强迫场之间的转化相对平稳, 对海洋模式没有明显冲击. 考虑到核泄漏污染源从岸边进入海洋是一个长期缓慢过程, 本研究将污染源浓度设置为恒定值. 示踪物预测采用的是基于 POM 模式的输运扩散方程, 不考虑核泄漏物质自身衰减及其在海洋中的沉降等过程.

考虑到不同泄漏时刻影响范围不同, 将核泄漏时间分别假设为 2011 年 2 月 14 日和 1 月 14 日, 进行情景数值实验以探讨影响范围与海洋流场的关系.

## 2 模拟和预测结果分析

### 2.1 大气通道模拟和预测结果分析

基于改进的 CCSM3 气候数值模式, 预测了泄漏后 3 个月内核物质随着大气的输运扩散过程. 图 1 给出了 2011 年 3 月 14 日~4 月 13 日 992 hPa 月平均大气环流场. 日本福岛受西太副热带高压系统控制, 近地面 3 月的月平均风场为西南风, 风速约为 5~8 m/s, 但是随着高度增加, 风速逐渐增大, 在对流层顶附近平均风速甚至大于 30 m/s.

图 2 给出了不同高度泄漏源所对应的影响范围, 模拟结果显示: 若泄漏源设置在大气模式的第一层

(992 hPa, 图 2(a)), 大气中的核泄漏物质 3 d 后就可以影响整个日本北方区域; 5 d 后主体向东北方向扩展, 可达白令海峡; 15 d 后核泄漏物质随着强西风可以跨越整个北太平洋、北美从而影响到欧洲, 但前锋区核泄漏物质浓度仅为  $3 \times 10^{-6}$ , 浓度比所设置的源区浓度低约 6 个量级. 20 d 后日本福岛的核泄漏物质影响范围跨越欧洲进入中国境内, 30 d 后形成封闭的纬带, 几乎影响到整个北半球, 但浓度值下降了 6 个量级. 若泄漏源在 5 km 高度(图 2(b)), 由于随着高度的增加风速逐渐增大, 5 d 后其影响范围将达到北美, 10 d 后将影响整个欧洲, 15 d 后则形成封闭的纬带. 若泄漏源在 10 km 高度(图 2(c)), 10 d 后则覆盖中国大部.

当然, 在源区(日本福岛)附近, 核泄漏物质可能达不到 5 和 10 km, 但即使在数值模式的最接近地面层, 大气通道输运速度仍然很快, 对核泄漏物质的输运扩散范围起决定性作用.

### 2.2 海洋表层通道模拟和预测结果

本文模拟了自 2011 年 3 月 14 日起 50 d 内的核泄漏物质随海流在海洋表层的输运扩散过程. 图 3 给出了日本福岛事故发生后 10, 20, 30 和 50 d 的核泄漏物质随海流输运扩散的分布情况. 图中箭头代表模拟的平均环流场分布, 流速小于 0.2 m/s 的分布略去, 红色实线表示泄漏源处核物质 1/1000 浓度的等值线分布, 以其表征核泄漏物质的影响范围. 可以看出, 20 d 后, 核泄漏物质向北输运扩散到约 38.5°N 位置

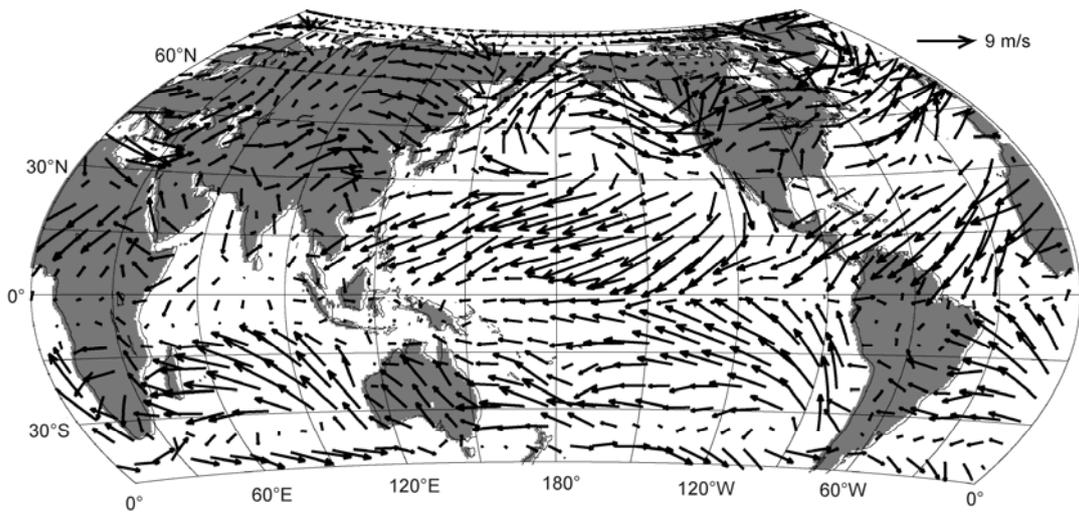


图 1 气候模式预测的 2011 年 3 月 14 日~4 月 13 日月平均 992 hPa 风场

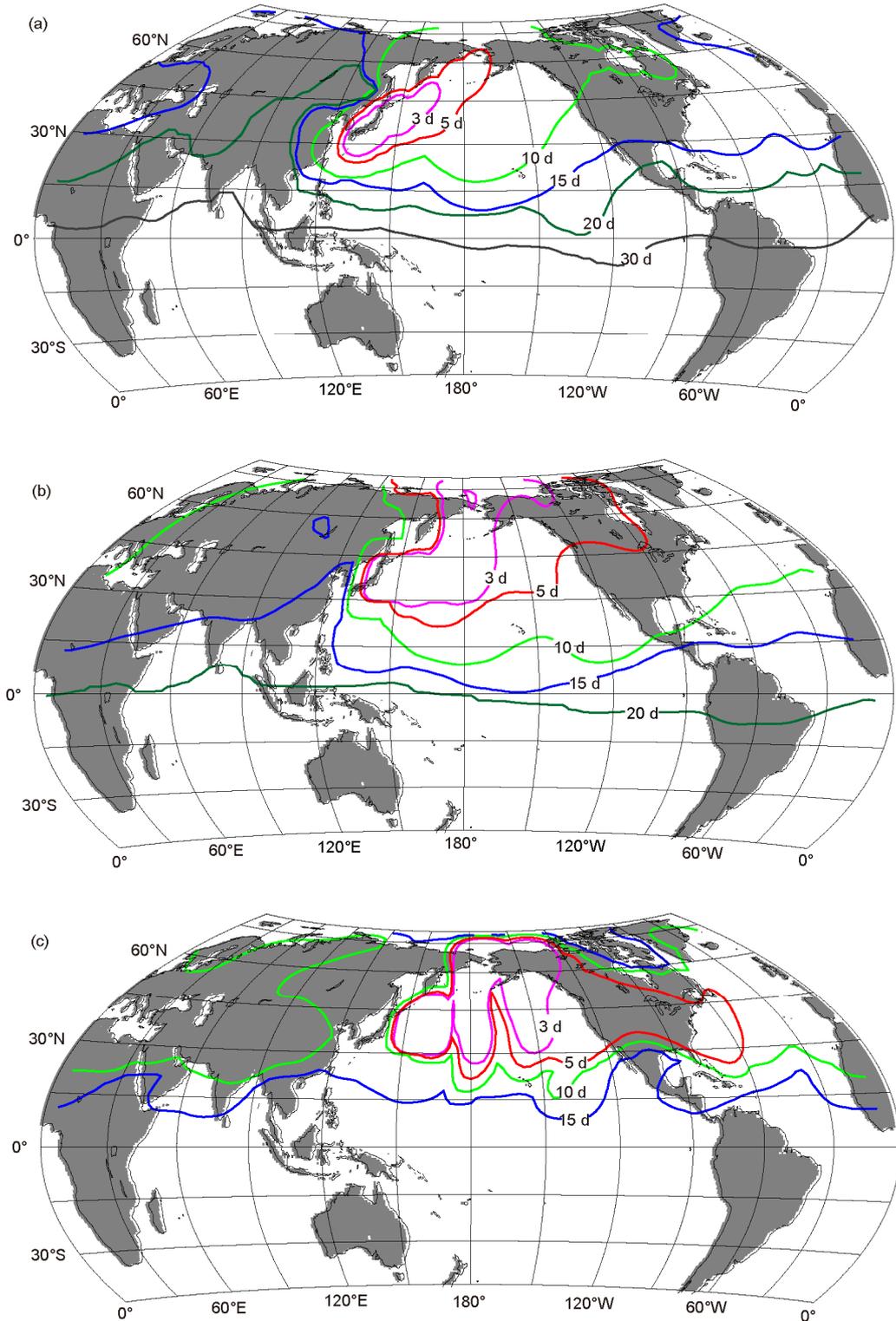


图2 假定福岛核泄漏物质源在不同高度(近地面(a)、5 km(b)和10 km(c)), 模式预测的核泄漏物质影响范围

紫色、红色、绿色、蓝色、墨绿色和黑色实线分别代表预测的不同时刻(3, 5, 10, 15, 20, 30 d) 全场最高浓度10%的浓度等值线, 以其代表核泄漏物质影响范围. 在3月14日最靠近福岛的大气模式网格点3层不同高度处分别放置浓度为1.0的核泄漏物质, (a)中各时刻(3, 5, 10, 15, 20, 30 d) 边缘线浓度值分别为  $1 \times 10^{-4}$ ,  $5 \times 10^{-5}$ ,  $1 \times 10^{-5}$ ,  $3 \times 10^{-6}$ ,  $2 \times 10^{-6}$ ,  $1 \times 10^{-6}$ ; (b)和(c)中各时刻(3, 5, 10, 15, 20 d) 边缘线浓度值分别为  $1 \times 10^{-4}$ ,  $5 \times 10^{-5}$ ,  $2 \times 10^{-5}$ ,  $7 \times 10^{-6}$ ,  $5 \times 10^{-6}$

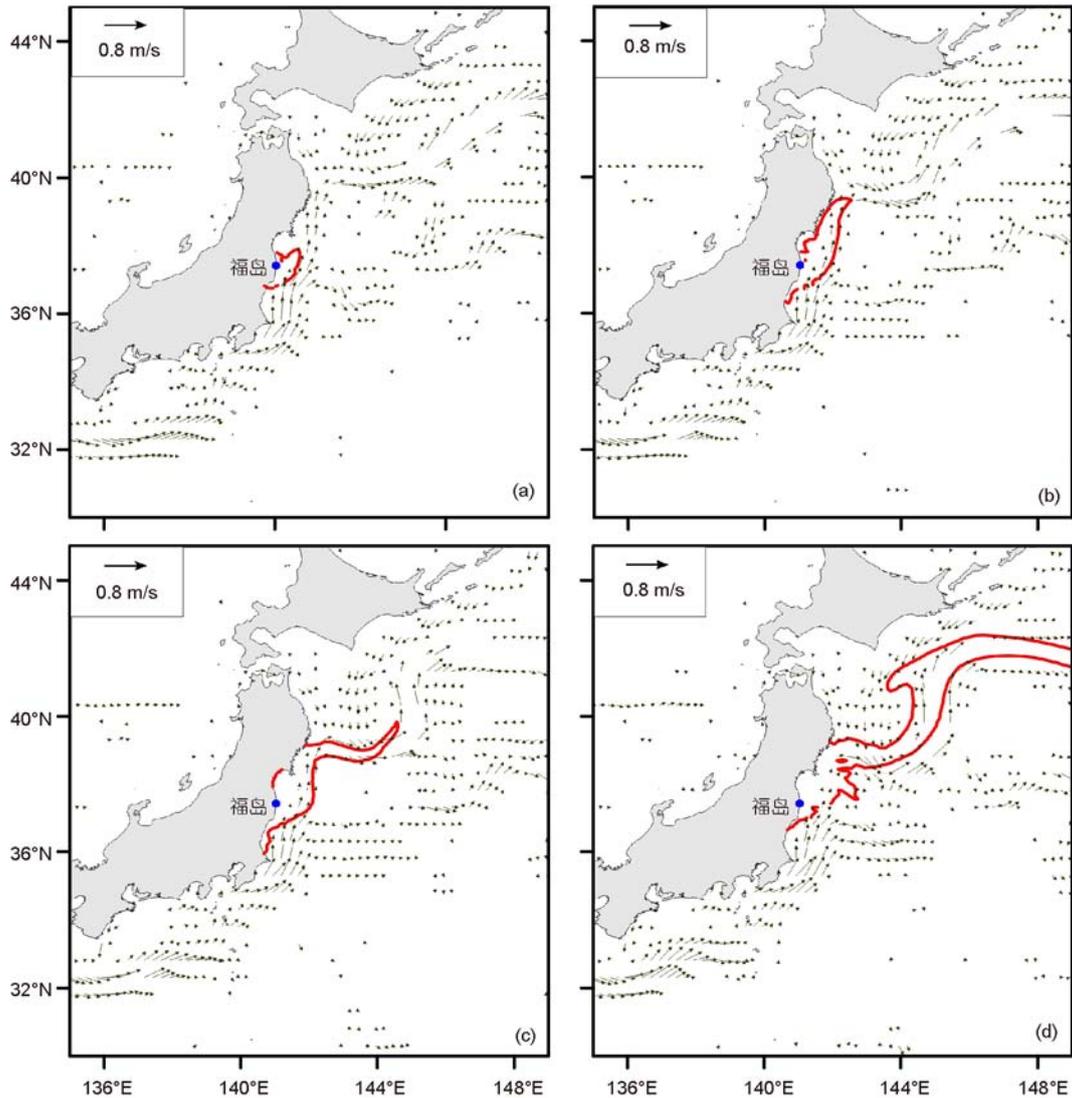


图3 模式预测的海洋表层流场(矢量)分布和核泄漏物质在海洋表层的影响范围(红线内)

红线表示泄漏源处核物质 0.001 浓度的等值线分布, 靠近福岛海洋网格点浓度设置为 1.0. (a)~(d) 分别代表核物质泄漏后 10, 20, 30 和 50 d 后的影响范围

向东转向; 50 d 内, 核泄漏物质随海流沿日本东海岸向东北输运扩散, 远离中国海域. 整体看来, 核泄漏物质在海表面输运速度比大气中慢得多, 且限制在一个窄带范围内.

### 2.3 理想实验结果

本研究设置了两组基于 CAM3 大气数值实验来讨论核泄漏物质输运扩散与大气环流场的关系. 两组实验核泄漏源都放置在近地层 992 hPa, 实验 1 假设福岛核泄漏事故发生在 2011 年 1 月 14 日, 实验 2 则假设发生于 2011 年 2 月 14 日(图 4). 从数值预测

结果可见, 两种假设条件下核泄漏物质输运速度比 3 月 14 日发生的泄漏输运速度更快, 20 d 后形成一个影响纬带, 这比实际情况提前了 10 d 左右.

本文设置了两组基于 MASNUM 耦合海洋模式的数值实验来研究核泄漏物质输运扩散与海洋环流场的关系. 实验 1 假定日本福岛核泄漏时间发生在 2011 年 1 月 14 日; 实验 2 假定日本福岛核泄漏时间发生在 2011 年 2 月 14 日. 为了能够得到更精确的环流场, 2011 年 3 月 14 日之前的气象强迫场采用 NCEP/NCAR 再分析数据, 14 日之后的数值实验采用考虑波致混合的 CCSM3 气候模式的预报结果. 图 5

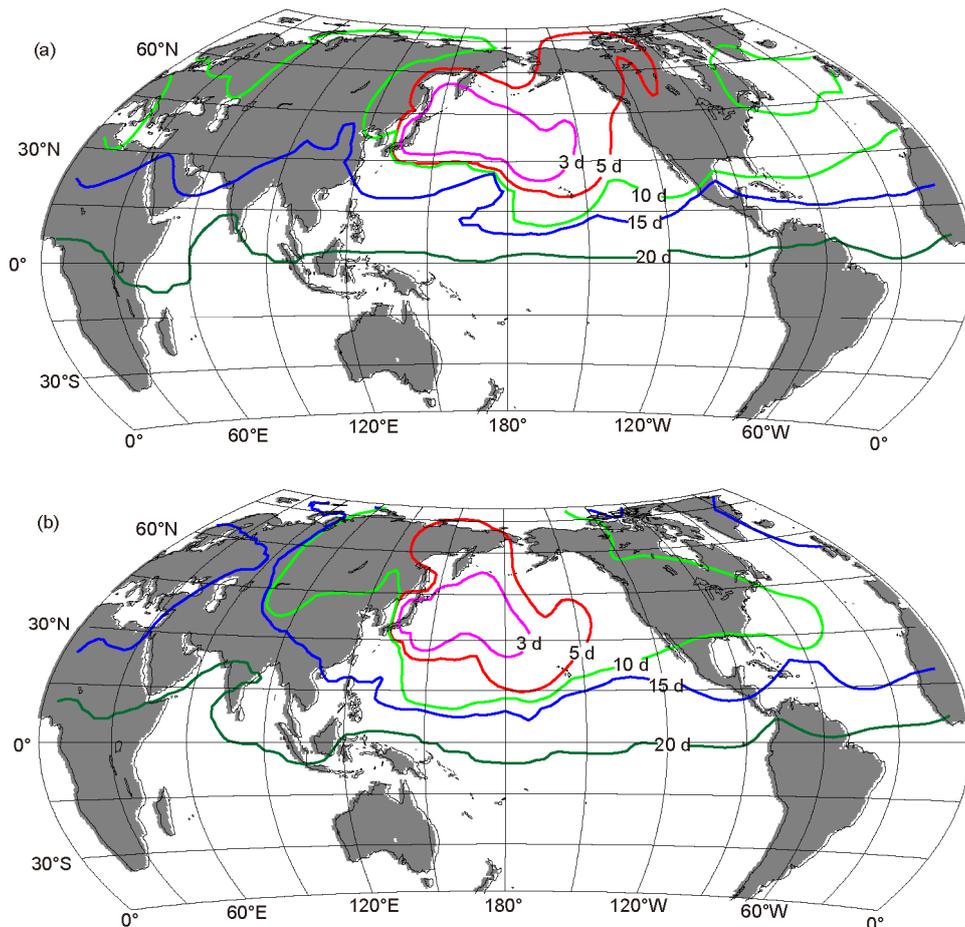


图4 人为假定不同泄漏日期情况下, 福岛核泄漏物质源在 992 hPa, 模式预测的核泄漏物质在大气中的影响范围 分别在 1 月 14 日(a)和 2 月 14 日(b)最靠近福岛的大气模式最下层网格点放置浓度为 1.0 的核泄漏物质, 各时刻(3, 5, 10, 15, 20 d) 边缘线浓度值分别为  $3 \times 10^{-5}$ ,  $1 \times 10^{-5}$ ,  $5 \times 10^{-6}$ ,  $3 \times 10^{-6}$  和  $1 \times 10^{-6}$

给出了两个数值实验的模拟结果. 红色、蓝色、紫色、和黑色粗实线分别表示核泄漏发生 10, 20, 30 和 40 d 后核泄漏物质的影响海域. 若该次核泄漏提前 2 个月发生(图 5(a)), 核泄漏物质只用 30 d 左右的时间就可以到达 150°E 海域, 这比实际发生核泄漏的运输扩散缩短了 20 d 左右; 若日本福岛的核事故提前发生在 2 月 14 日(图 5(b)), 核泄漏物质随着洋流在 40 d 内就到达 150°E 的北太平洋海域, 这比实际发生核泄漏的运输扩散缩短了 10 d 左右. 可见, 不同时段的海流场对于核泄漏物质的运移速度有显著影响.

### 3 讨论

针对由 2011 年 3 月 11 日日本地震和海啸引发的福岛核电站泄漏事件, 基于改进的 CCSM3 气候数值模式和 MASNUM 海浪-潮流-环流耦合数值模式, 预

测了核物质泄漏后 3 个月内的三维风场和三维海流场, 以及核泄漏物质的影响范围.

对泄漏物质做如下理想条件假设: 认为核泄漏物质仅随风场或者海流场漂移和扩散, 不考虑核泄漏物质的沉降过程, 也没有考虑核泄漏物质自身的物理变化(如衰变等); 目前只是在模式一个格点上放置了单位浓度的泄漏源, 模拟了核泄漏物质的影响范围, 并没有给出其真实的浓度分布, 实际上, 随着扩散范围增加, 浓度会随之降低; 假定泄漏物质在源区可以到达高空, 核泄漏物质在源区可到达的实际高度尚未查到权威数据.

另外, 不论是海洋环流数值模式还是气候模式, 其预测结果均存在误差, 而且这种误差通常会随着预测时间增加而累积.

在上述假设基础上, 对核泄漏物质的运输扩散

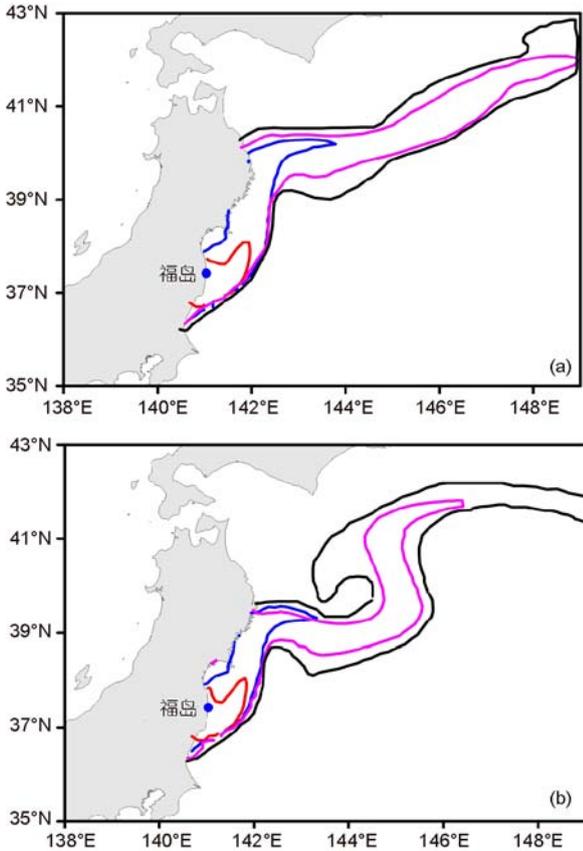


图5 人为假定不同泄漏日期(2011年1月14日(a)和2月14日(b)), 模式预测的核泄漏物质在海洋表层的影响范围  
 红色、蓝色、紫色和黑色粗实线分别是事故发生10, 20, 30和40 d后核泄漏物质影响海域

进行了为期3个月的数值预测;并假定泄漏发生在不同时刻,进行了情景模拟和预测。

**大气通道:** 由于该纬带盛行强劲西风,若核泄漏物质初始设置在近地层992 hPa,10 d后影响范围可达北美大部,但前锋的浓度比所设置的源区浓度已经低约6个量级,20 d后跨过欧洲,前锋进入中国境内,30 d则布满整个纬带;若核泄漏物质初始设置在5 km高度,10 d后影响范围可覆盖欧洲,15 d后即可布满整个纬带;若核泄漏物质初始设置在10 km高度,10 d后即可跨越北美和欧洲,进而影响中国大部分区域。

**表层海洋通道:** 若核泄漏物质进入海洋,则会随海洋表层通道向东北缓慢运输,50 d后到达150°E左

右,但影响范围仅限于一条窄带内。

数值实验表明:假定核泄漏事件发生在1月14日或2月14日,通过大气通道向东的输运速度更快,在海洋中输运速度也加快。

影响北半球这些国家的核泄漏物质浓度仍需进一步监测和评估,处于上游的美国、加拿大甚至欧洲对核泄漏物质的监测、评估结果将对下游国家和地区具有示范和借鉴意义。另外,考虑到这些泄漏物质还存在沉降和衰变等,照常理推断,当其余脉到达中国上空时,浓度量值应该比目前估计的还要低。若能在上游(如欧洲)进行大气环境质量的监测,则也可给科学决策提供支撑。

联合国全面禁止核试验条约组织2011年4月7日通过其网站公布了针对日本核泄漏物质扩散漂移的监测情况(<http://www.ctbto.org/press-centre/highlights/2011/fukushima-related-measurements-by-the-ctbto/fukushima-related-measurements-by-the-ctbto-page-1/>),基本上验证了本文的预测结果。3月12日在距福岛核电站约300 km的日本高崎监测站首先监测到核放射性物质。3月14日俄罗斯东部发现放射性同位素,之后2 d到达美国西海岸。事故发生9 d后,放射性物质横穿北美大陆,12 d后到达冰岛,表明核物质已扩散至欧洲。15 d后,北半球大部分检测站均监测到放射性物质。该组织同时声明,截止到4月7日,在日本之外的监测站检测到的放射性剂量均远远低于阈值,不会对环境及人类健康造成危害。上述监测结果与本文预测结果基本吻合。

最后,提高本文评估结果的定量化水平,还需要以下4方面工作:第一,对于全球气候模式而言,大气模式的分辨率约为 $2.8^{\circ} \times 2.8^{\circ}$ ,提高模式分辨率能够更真实模拟扩散等物理过程,但这需要更多的计算资源;第二,大气模式最接近地面的等压面为992 hPa,如果福岛核泄漏物质低于此高度,则输运扩散速度应该会有所降低;第三,对核泄漏物质的水平扩散系数,采用了大气中一般示踪物质的扩散系数;第四,福岛源区的总体核泄漏物质总量应该用实际监测值,目前设置为一个模式网格单位浓度。尽管如此,总体的路径和影响范围评估应该基本可靠。

**致谢** 中国科学院大气物理研究所吴国雄院士对本文提出了宝贵建议,特此致谢。

参考文献

- 1 孙明华, 宋振鑫, 吕冬亮, 等. 区域大气环境应急响应数值预报系统. 气象科技, 2010, 38: 635–641
- 2 丑纪范, 徐明. 短期气候数值预测的进展和前景. 科学通报, 2001, 46: 890–895
- 3 Collins W D, Bitz C M, Blackmon M L, et al. The community climate system model: CCSM3. J Clim, 2006, 19: 2122–2143
- 4 Collins W D, Rasch P J, Boville B A, et al. The formulation and atmospheric simulation of the Community Atmosphere Model Version 3 (CAM3). J Clim, 2006, 19: 2144–2161
- 5 Dickinson R E, Oleson K W, Bonan G, et al. The Community Land Model and its climate statistics as a component of the Community Climate System Model. J Clim, 2006, 19: 2302–2324
- 6 Briegleb B P, Bitz C M, Hunke E C, et al. Scientific description of the sea ice component in the Community Climate System Model, Version Three. Technical Report NCAR/TN-463+STR. 2004
- 7 Simith R D, Gent P R. Reference manual for the Parallel Ocean Program (POP), ocean component of the Community Climate System Model (CCSM2.0 and 3.0). Technical Report LA-UR-02-2484. 2002
- 8 Zhou T, Yu R. Twentieth century surface air temperature over China and the globe simulated by coupled climate models. J Clim, 2006, 19: 5843–5858
- 9 Davey M, Huddleston M, Sperber K, et al. STOIC: A study of coupled model climatology and variability in tropical ocean regions. Clim Dyn, 2002, 18: 403–420
- 10 Qiao F, Yuan Y, Yang Y, et al. Wave-induced mixing in the upper ocean: Distribution and application to a global ocean circulation model. Geophys Res Lett, 2004, 31: L11303, doi: 10.1029/2004GL019824
- 11 Song Z, Qiao F, Wang C. The correctness to the spuriously simulated semi-annual cycle of the sea surface temperature in the equatorial eastern Pacific. Sci China Earth Sci, 2011, 54: 438–444
- 12 宋振亚, 乔方利, 赵伟. 波致混合对 CCSM3 气候模式预测能力的改进. 自然科学进展, 2009, 19: 203–211
- 13 Xia, C, Qiao F, Yang Y, et al. Three-dimensional structure of the summertime circulation in the Yellow Sea from a wave-tide-circulation coupled model. J Geophys Res, 2006, 111: C11S03, doi:10.1029/2005JC003218
- 14 Lü X, Qiao F, Wang G, et al. Upwelling off the west coast of Hainan Island in summer: Its detection and mechanisms. Geophys Res Lett, 2008, 35: L02604, doi:10.1029/2007GL032440
- 15 Qiao F, Yuan Y, Ezer T, et al. A three-dimensional surface wave-ocean circulation coupled model and its initial testing. Ocean Dyn, 2010, 60: 1339–1355
- 16 Lü X, Qiao F. Distribution of sunken macroalgae against the background of tidal circulation in the coastal waters of Qingdao, China, in summer 2008. Geophys Res Lett, 2008, 35: L23614, doi: 10.1029/2008GL036084
- 17 乔方利, 王关锁, 吕新刚, 等. 2010 年与 2008 年黄海浒苔漂移运输特征对比. 科学通报, 2011, 56
- 18 You Y, Sugimoto N, Fukasawa M, et al. Transport of North Pacific Intermediate Water across Japanese WOCE sections. J Geophys Res, 2003, 108: 3196, doi: 10.1029/2002JC001662
- 19 Liu Q, Hu H. A subsurface pathway for low potential vorticity transport from the central North Pacific toward Taiwan island. Geophys Res Lett, 2007, 34: L12710, doi: 10.1029/2007GL029510
- 20 Chen H, Zhou T, Neale R B, et al. Performance of the new NCAR CAM3.5 in East Asian summer Monsoon simulations: Sensitivity to modifications of the convection scheme. J Clim, 2010, 23: 3657–3675
- 21 Reynolds R W, Smith T M, Liu C, et al. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. J Clim, 2007, 20: 5473–5496
- 22 Wang G, Qiao F, Xia C. Parallelization of a coupled wave-circulation model and its application. Ocean Dyn, 2010, 60: 331–339
- 23 Blumberg A F, Mellor G L. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: Heaps N S, ed. Three Dimensional Coastal Ocean Models, Vol 4. Washington, D C: American Geophysical Union, 2010. 1–16
- 24 Xia C, Qiao F, Zhang Q, et al. Numerical modeling of the quasi-global ocean circulation based on POM. J Hydrodyn, 2004, 16: 537–543
- 25 Yuan Y, Pan Z, Hua F, et al. LAGFD-WAM numerical wave model—I. Basic physical model. Acta Oceanol Sin, 1991, 10: 483–488
- 26 杨永增, 乔方利, 赵伟, 等. 球坐标系下 MASNUM 海浪数值模式的建立及其应用. 海洋学报, 2005, 27: 1–7