中国科学: 地球科学 2014 年 第 44 卷 第 2 期: 271 ~ 282
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

日本大地震福岛核污染物扩散传输区域模拟研究

费建芳[①*], 王鹏飞[①②], 程小平[①], 黄小刚[①], 王益柏[③]

① 解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101;
② 海军大连舰艇学院, 大连 116018;
③ 61741 部队, 北京 100094
* E-mail: feijf@sina.com

收稿日期: 2012-10-11; 接受日期: 2013-06-01; 网络版发表日期: 2014-01-13
国家公益性行业专项(编号: GYHY201306061)和国家自然科学基金项目(批准号: 41230421, 41105065, 41005029, 41275128)资助

摘要 2011 年 3 月 11 日日本大地震引发了福岛核电站放射性污染物泄漏事故. 根据日本官方公布的污染物释放量, 通过核泄漏放射性物质的源项设计, 采用 CMAQ 模式中 $PM_{2.5}$ 作为核污染物的示踪物, 并考虑核污染物扩散和干湿沉降过程等, 建立了基于大气模式 WRF 和空气质量模式 Models-3/CMAQ 的耦合模式系统. 在此基础上, 分别采用 30 和 4 km 模式水平分辨率对放射性污染物中远距离和近距离(局地)扩散传输路径和强度进行了 5 天数值模拟. 中远距离模拟结果表明: 福岛核事故发生之后, 受西风带影响, 放射性污染物大部分时间向太平洋东部方向扩散, 5 天后到达美洲大陆, 但浓度仅相当于福岛核电站附近的 10^{-7}左右, 模拟的污染物到达美国的时间与加利福尼亚州 3 月 18 日的监测结果基本吻合, 同时发现, 由于高空西风风速大于低层, 污染物的分布随高度形成向东倾斜的垂直结构. 对近距离(局地)高分辨率模拟结果表明: 伴随气旋过程的大风和降水可加快污染物的扩散传输和局地沉降, 同时, 气旋性环流又可使污染物改变传输路径, 甚至对局地造成重复影响. 污染物于 3 月 14 日 18 时扩散到日本本州岛东南部, 模拟结果与当地观测的吸收剂量率增加时间基本一致. 结果表明, 福岛核事故放射性污染物主要以向东扩散传输为主, 即使在气旋系统的影响下, 对日本本土的影响时间较短, 因此从大气条件角度看, 福岛核电站的选址比较科学, 对其他核设施的选址和保护具有借鉴意义.

关键词
放射性污染物
福岛
扩散传输
CMAQ
数值模拟

2011 年 3 月 11 日 05 时 46 分(世界时, 下同), 日本本州岛以东太平洋海域(38.0°N, 142.9°E)发生里氏 9.0 级地震并引发海啸, 东京电力公司下属的福岛第一核电站(37.3°N, 141.0°E)遭到严重毁坏, 导致了放射性污染物(^{131}I, ^{137}Cs 等)的泄漏, 对公众健康和环境造成了严重影响. 从 3 月底开始, 根据我国环保部公布的监测结果(http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/qt/201104/t20110419_209414.htm), 在我国多个省市监测到放射性核素 ^{131}I. 日本原子能安全与保安院(Nuclear and Industrial Safety Agency, NISA)在 4 月 12 日上午将本次事故升至最高的第七级, 福岛核事故成为国际核事件分级表中继切尔诺贝利之后的第二

中文引用格式: 费建芳, 王鹏飞, 程小平, 等. 2014. 日本大地震福岛核污染物扩散传输区域模拟研究. 中国科学: 地球科学, 44: 271–282
英文引用格式: Fei J F, Wang P F, Cheng X P, et al. 2014. A regional simulation study on dispersion of nuclear pollution from the damaged Fukushima Nuclear Power Plant. Science China: Earth Sciences, doi: 10.1007/s11430-013-4811-2

个七级事故.

核泄漏发生后, 放射性污染物通过 3 类自然通道——大气输运通道、海洋表层海流输运通道以及海洋内部输运通道扩散输运(乔方利等, 2011). 其中污染物在大气通道中扩散传输速度最快并受复杂多变的气象条件影响. 影响放射性沾染的气象要素主要包括风、降水、大气垂直运动和稳定度等(张军, 2005). 核污染物在气象环境的作用下, 根据粒子重量的不同, 造成近区沾染、远区沾染甚至全球沾染. 雨雪天气会加速放射性粒子的沉降(矫梅燕, 2010), 使降水区的地面沾染加重、空气中污染物明显减少, 从而影响污染物的扩散.

福岛核电站所处纬带盛行西风, 在大气环流作用下, 污染物大部分时间将会稳定向东输运扩散, 对我国影响较小, 但春季复杂多变的天气形势使污染物的扩散态势表现复杂. 在春季, 东亚地区气旋活动频繁(姚素香等, 2003), 是该季节影响日本的主要天气过程(张颖娴等, 2012). 气旋过程常常引起大风和降水可加快污染物的扩散传输和局地沉降.

数值模式是定量评估核事故中放射性污染物在大气中输运强度和路径的重要手段. 从 1989 年开始, 国际原子能机构(IAEA)、世界气象组织(WMO)等国际机构联合组织进行了“大气扩散模式评估研究”活动 [1], 使大气扩散模式被广泛应用于进行应急决策和放射性污染物的模拟. 目前, 应用于放射性污染物扩散模拟和预报的数值模式主要包括拉格朗日型和欧拉型 2 类. 拉格朗日型模式假定所考虑的成分在一个气团中充分混合, 这一气团随平均气流移动, 通过描述轨迹中气团内的物理、化学变化, 就可以得到污染物分布的图像. 国际上很多机构开发了拉格朗日型扩散模式, 并将其应用到放射性污染物的模拟中, 如 FLEXPART 模式(Stohl 等, 2005)、拉格朗日粒子扩散模式 ParModel(姚仁太等, 2005)、Monte Carlo 多源模式(张美根等, 1999)等, 一些大气扩散模型如分段烟雨模型、烟团模型以及粒子-烟团扩散模式也迅速发展(蔡旭辉等, 2000). 在此次核泄漏物质的预报中, 拉格朗日型的大气扩散模式被广泛应用. 奥地利中央气象和地球动力研究所(http://www.zamg.ac.at/cms/de/aktuell)、芬兰气象局(http://en.ilmatieteenlaitos.fi/japan)、挪威大气研究所(http://transport.nilu.no/products/fukushima)以及北京区域环境紧急响应中心等众多机构都基于此类模式进行数值模拟并发布短期放射性污染物扩散态势的预测. 然而, 拉格朗日型扩散模式通常无法包括气流夹卷作用, 云引起的垂直混合以及其他的输送和混合效应, 另外对干、湿沉降过程的考虑都比较简单. 而欧拉模式在模拟污染物长距离输送过程中, 可同时包括多种物理、化学过程, 并在一定的假设下对其进行综合的数值计算, 这是拉格朗日型模式所不可能完成的(高会旺等, 1997). 大型污染物长距离输送欧拉型模式包括美国的空气质量模式 Models-3/CMAQ(Byun, 1999)(Community Multi-Scale Air Quality Model)、日本全球变化研究所的化学天气预报模式 CFORS(Uno 等, 2004)(Chemical Weather Forecast System)等. 其中 CFORS 模式已经被成功改进并应用在模拟核试验放射性烟云的扩散中(郑毅等, 2000), 并在高空和低空核试验中取得较好模拟效果(张彦等, 2008a, 2008b). CMAQ 模式既能准确模拟污染物的长距离输送, 又可以充分考虑到污染物的干、湿沉降过程, 对扩散和平流过程、云和气溶胶效应、烟羽处理等多种物理过程考虑得比较全面, 能在不同气象条件和环境条件下, 更细致地模拟出核泄漏期间污染物扩散和沉降等过程.

本文在大气模式 WRF(Weather Research and Forecasting Model)和空气质量模式 Models-3/CMAQ 基础上, 通过设计改进放射性源项、考虑干湿沉降过程等建立耦合模式系统, 分别采用 30 和 4 km 水平分辨率对放射性污染物的中远距离输运和局地(近距离)影响进行了数值试验, 对此次核事故放射性污染物的输送过程和影响范围进行模拟和评估, 分析了不同气象条件下放射性污染物对日本周边地区的影响, 并对耦合模式系统的有效性进行了初步验证, 同时得到一些污染物扩散输运的初步结果.

1 核污染物扩散传输区域模拟预报系统

基于大气模式 WRF 和空气质量模式 Models-3/CMAQ, 通过核泄漏放射性物质的源项设计, 建立核污染物扩散传输区域模拟预报耦合模式系统, 主要用于核污染物中远、近距离扩散传输和沉降过程的模拟预报研究. 系统流程如图 1 所示, 具体介绍见下文.

1) IAEA, WHO, ECE. 1989. ATMES technical specification document

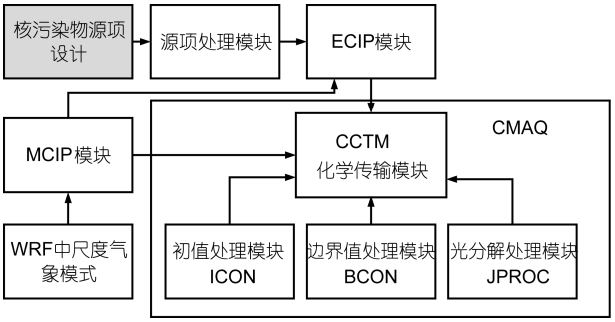


图 1　耦合模式系统组成和流程

1.1　大气模式 WRF

WRF 模式由美国 NCAR(National Center for Atmospheric Research), NCEP(National Centers for Environmental Prediction)等机构联合开发, 已在国际上广泛应用于数值天气模拟与预报. 该模式采用完全可压非静力模式, 控制方程组为通量形式, 网格形式采用 Arakawa C 格点. WRF 模式包含一整套完整的物理过程, 如辐射过程、边界层参数化过程、对流参数化过程、次网格湍流扩散过程以及微物理过程等. 该模式具有可移植、易维护、可扩充、高效率等诸多特性. 模式结果经过 MCIP(Meteorology-Chemistry Interface Processor)模块转化可以为源项处理模块和 CMAQ 模式提供气象背景资料以及污染物的干沉降速度.

1.2　空气质量模式 Models-3/CMAQ

Models-3 模式是美国环保局开发的能够模拟复杂的大气物理、化学反应的空气质量模式, 可应用于环境评估及决策分析. CMAQ 模式是 Models-3 的核心部分, 可以模拟多种污染物的输送和转化过程. CMAQ 模式中最主要的模块为化学反应机制处理模块(CCTM), 它所包括的过程可分为 3 类: 一类是纯粹与化学有关的各种反应物的化学反应过程, 化学过程可选用 CB-IV(Carbon Bond-IV)或 RADM2 (Regional Acid Deposition Model)等机制; 第二类是纯粹与气象有关的扩散和平流过程, 污染物的输送过程包括平流以及次网格尺度的扩散, 平流与水平风场有关, 扩散中包括次网格尺度的湍流扩散; 第三类是既与化学又与气象有关的一些过程, 这些过程大致可分为三种: 第一种是与辐射有关的光分解过程, 第二种是污染物的烟羽扩散过程, 第三种是与云有关的化学过程. 模式中气体和粒子的干沉降速率公式分别为 $V_d=(R_a+R_b+R_c)^{-1}$和 $V_d=(R_a+R_b+R_aR_bV_g)^{-1}+V_g$, 其中 R_a 为空气动力学阻力系数, R_b 为次边界阻力系数, R_c 为表面阻力系数, V_g 为粒子下沉速度, 在对阻力系数的参数化过程中详细考虑了 WRF 模式提供的地表植被分布状况. 模式中的湿沉降根据具体情况考虑污染物被云水吸收或通过计算亨利平衡方程来确定湿沉降量. 模式对扩散和平流过程、云和气溶胶效应、烟羽处理、气溶胶干沉降模拟等多种物理过程考虑全面, 能在气象和环境条件下, 模拟核泄漏期间放射性粒子的扩散和沉降等过程. CMAQ 模式已在国内外广泛应用, 近年来, 本文作者也用于臭氧、沙尘暴和大雾等大气污染物的模拟研究(卢燕和费建芳, 2005, 王益柏等, 2009, Wang 等, 2012, 费建芳等, 2009).

1.3　放射性源项设计

为了对日本福岛核事故污染物的扩散态势进行数值模拟, 核污染物排放源的处理十分重要, Models-3/CMAQ 可以 MEPPS(Models-3 Emission Processing and Projection System)作为源项的处理部分. MEPPS 根据周围的气象条件和社会经济活动模拟排入大气中的微量气体及颗粒物, 将排放源分为点源、面源、移动源和生物源四类, 并使用与之相对应的处理模块进行处理. 本模拟预报系统对 MEPPS 模块进行了改进, 使其可以根据核事故的具体情况在核泄漏区域设置放射性核素排放点, 使放射性核素以设定的排放速率从排放点释放. 放射性颗粒的浓度单位使用放射性活度浓度单位 Bq m^{-3}(贝克勒尔/立方米).

考虑到日本福岛核事故并没有出现爆发性向高空喷射放射性粒子的情况(Stohl 等, 2012), 根据本次核事故发生的原因以及放射性核素的泄漏方式, 设定放射性粒子在地面层释放, 释放点位于福岛核电站所在位置(37.3°N, 141.0°E). 核事故释放出的各种粒子在重量上相差较大, 且易被大气中的悬浮物吸附, 在空气中悬浮, 形成放射性气溶胶. 本文假设放射性物质吸附在气溶胶粒子上, 并选用 CMAQ 模式中 $PM_{2.5}$(直径小于 2.5 μm 的气溶胶粒子)作为核污染物的示踪物, 并设定粒子的放射性活度正比于粒子质量, 粒子从模拟开始以均匀速度不断释放直到模拟结束, 并全部被释放到空中. 该假定会使模拟的污染物的浓度与实际情况略有区别, 但不会影响其扩

散输运的态势. 最后, 依据气象条件以及环境状况运用 ECIP(Emission-Chemistry Interface Processor)模块进行处理, 将数据处理成逐时且三维的格式, 为 CMAQ 模式提供放射性粒子实时排放数据.

2 核污染物中远距离扩散和输运模拟

2.1 模式参数设置

3 月 12 日凌晨, 强震导致福岛第一核电站发生爆炸, 结合气象观测时间和所能获取的气象背景场资料, 假设定放射性核素 ^{137}Cs 于 3 月 12 日 00 时开始从福岛核电站连续释放. 模拟区域从我国东部一直到美洲西部, 涵盖 20°N 以北太平洋. 系统采用 NCEP FNL(Final)全球再分析资料作为区域气象模式的初边界条件. 该数据覆盖全球, 空间分辨率为 1°×1°, 时间间隔 6 h, 即每天的 00, 06, 12 和 18 时. 该数据是位于各等压面上(地面到 10 hPa 高度)的气象场, 主要包括位势高度、温度、位温、风、海平面温度、降水和对流顶层气压等物理量. 放射性物质的释放强度参考日本核安全委员会(NSC, Nuclear Safety Commissions of Japan)在 2011 年 4 月 23 日公布的 4 月 5 日的 ^{137}Cs 的释放量(0.14 TBq h^{-1}), 即每天累计的放射性总量为 3.36×10^{12} Bq, 释放精度为 0.5°×0.5°, 释放位置位于福岛第一核电站的地面层(37.3°N, 141.0°E), 假定放射性核素按每秒钟均匀释放(3.89×10^{7} Bq s^{-1})并输入到模式计算, 其他具体参数如表 1 所示. 系统采用较粗水平分辨率(30 km), 主要分析研究核污染物在大尺度环流条件下的中远距离输送情况. 为方便, 称该模拟为试验 1.

2.2 核污染物中远距离扩散模拟

模拟结果表明, 从 2011 年 3 月 12 日 00 时开始, 污染物持续向东偏北的方向扩散输运, 3 月 13 日 12 时, 污染物向东到达 160°E, 向北扩散到 47°N 附近(图 2(a)); 14 日 12 时开始越过 180°经线(图 2(b)), 进入太平洋中部海域; 随后污染物扩散速度加快, 在 3 月 15 日 12 时, 污染物已经到达美国西部海域, 向北可以影响到俄罗斯的勘察加半岛(图 2(c)); 3 月 16 日 12 时, 污染物到达北美洲的西海岸, 首先进入美国的华盛顿州、俄勒冈州和加利福尼亚州, 但浓度仅为福岛核电站周围的 10^{-7} 左右(图 2(d)). 全面禁止核试验条约组织(CTBTO, Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization)在 3 月 18 日对加州的辐射值进行了监测, 结果表明辐射值比平时增加了 100 倍, 大约 10 μSv h^{-1}(微西弗/时), 该数据证实了一定浓度的放射性污染物已经从福岛地区跨过太平洋扩散到美国 (http://www.epa.gov/japan2011/data-updatesmarch.html#18), 但数值仍然不足自然辐射中岩石和太阳辐射的 10^{-6}, 不足以对公众安全和生活造成影响. 从监测数据与本次模拟情况比较可以看出, 模拟的污染物达到美国的时间和监测数据的时间基本吻合, 验证了本模式对放射性污染物扩散态势及影响范围的模拟是较合理的.

气旋是一个辐合上升系统, 因此气旋中心附近又是污染物的集中区, 上升气流可使污染物输送到高层, 高空气流携带的污染物可造成远距离输送和影响. 在核事故发生期间, 一次来自我国东北的温带气旋自西向东经过日本东北部洋面. 图 3 是 3 月 14 日 12 时韩国气象局发布的地面天气分析图, 可见气旋中心位于(46.5°N, 151.5°E)附近. 图 4 是模拟的同时刻海平面气压、850 hPa 层垂直速度和 500 hPa 风场, 模拟的气旋中心位置(46°N, 151°E)和东亚地面天气形势与实际基本一致.

气旋前部的强上升运动(图 4 中 46°N, 155°~160°E 区域)十分有利于污染物的向上输运. 图 5 是 3 月 14 日 9 时和 18 时从日本东部到太平洋中部(140°~

表 1 试验 1 模式参数设置

类别	WRF	CMAQ
区域中心位置	(40°N, 142°E)	(40°N, 142°E)
网格数, 水平分辨率	300×150, 30 km	297×147, 30 km
垂直分层	不等距 28 层	不等距 28 层
物理、化学过程	Lin 微物理方案, RRTM 长波辐射方案, Dudhia 短波辐射方案, Noah 陆面过程方案, Betts-Miller-Janjic 积云参数化方案和 YSU 边界层参数化方案	CB4 化学机制
模拟时段	2011 年 3 月 12 日 00 时至 17 日 00 时, 共模拟 5 d	

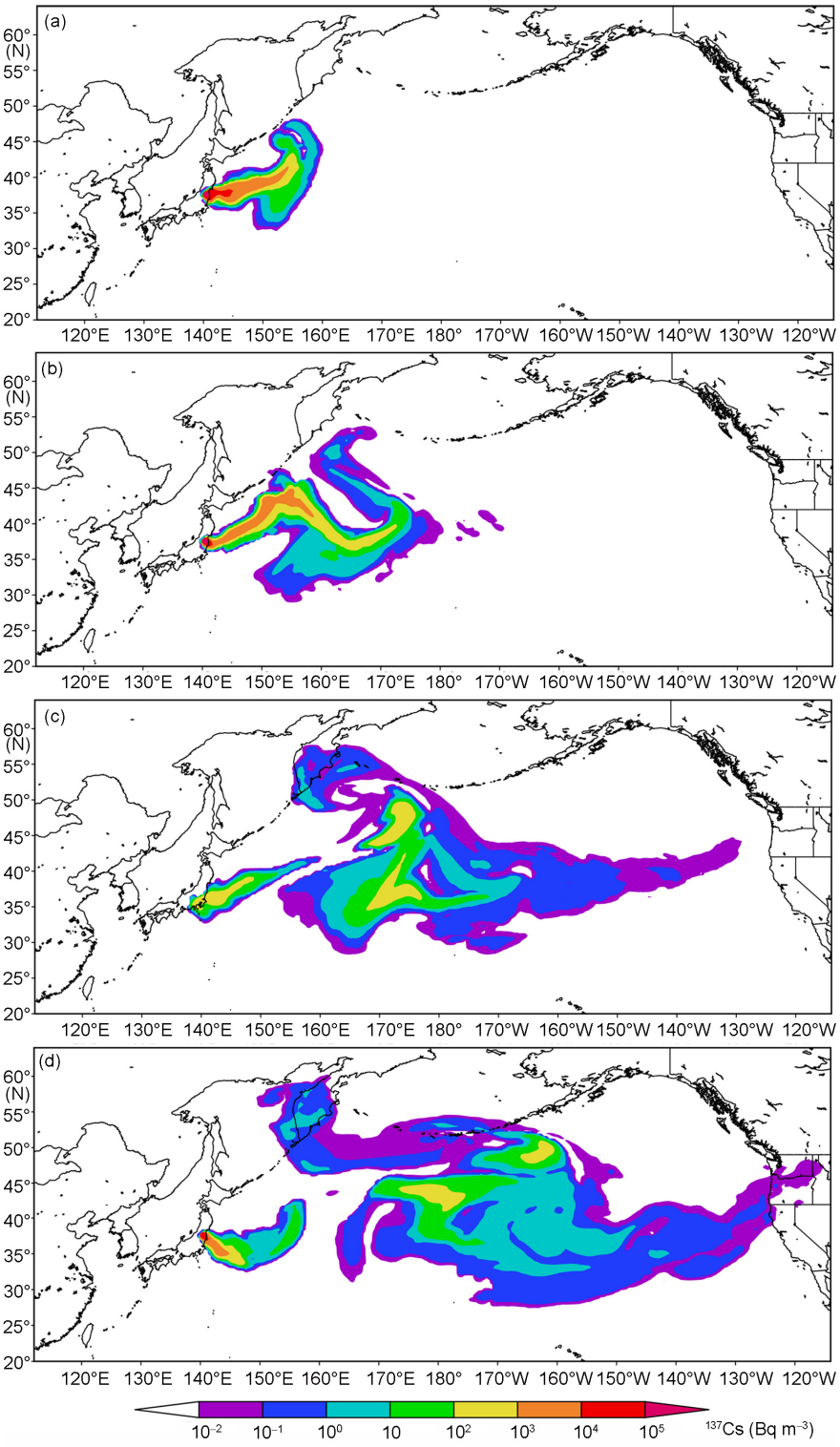


图 2　福岛核电站泄漏放射性粒子 ^{137}Cs 在近地面大气中的放射性活度模拟结果

图(a)~(d)分别为 2011 年 3 月 13 至 16 日的 12 时

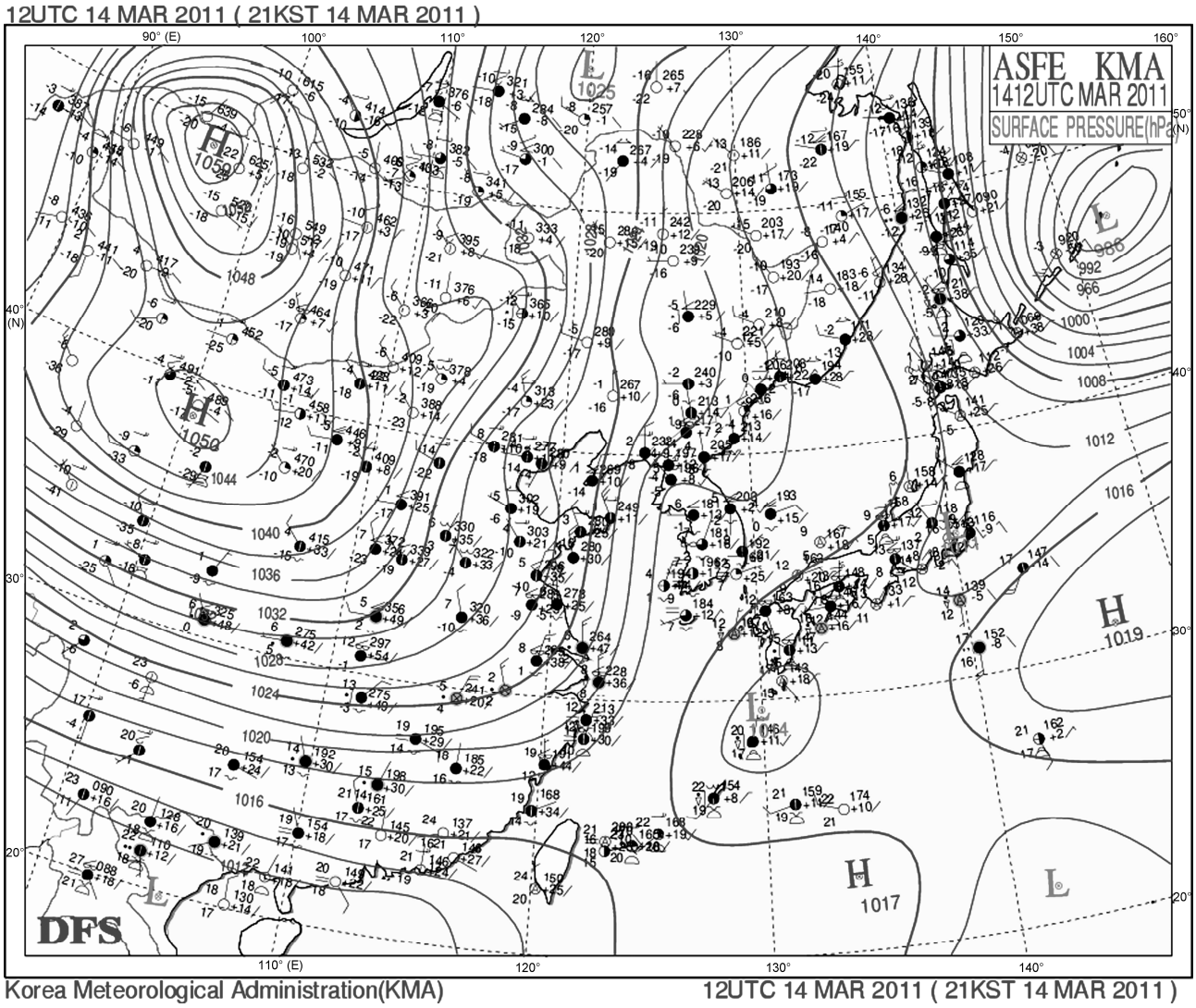


图 3　2011 年 3 月 14 日 12 时地面天气图

来自韩国气象局(http://web.kma.go.kr/chn/weather/images/analysischart.jsp)

180°E)模拟的位温(实线)、放射性烟团浓度(彩色区)、纬向风和垂直风(矢量)的沿 46°N 的垂直剖面图, 从图中可以看到, 气旋伴有冷锋过程, 辐合上升运动将核泄漏物质带到高层, 使 10^3 Bq m^{-3} 浓度以上的放射性核素上升到 4 km 高度附近, 污染物中心也被抬升至 1.5 km 高度左右(图 5(a)). 放射性污染物的传输速度与所处高度有密切的联系, 一般在对流层中, 污染物的扩散传输速度是与高度成正比的. 由于风速随高度增加, 污染物区域形成了随高度向东倾斜的垂直结构, 受该高度高空风影响, 扩散速度加快, 污染烟团中心在 12 h 中就向东移动了约 10 个经度. 3 月 14 日 18 时, 气旋中心已经移动到堪察加半岛南部海域(48°N, 159°E), 该纬度的等位温线的坡度才逐渐变小, 垂直气流有所减弱, 污染物的浓度有所降低(图 5(b)). 3 月 15 日 12 时污染物的扩散范围比前一天明显扩大(图 2(b)和(c)), 这与此次气旋带来的上升气流有明显的关系. 尤其是在西风急流带具有较大的风速, 在 3 月 12 至 17 日, 急流中心的风速大于 40 m s^{-1}. 污染物一旦进入 5 km 以上的高空西风急流带, 如平均西风风速以 35 m s^{-1} 计算(略小于中心风速), 则将以每天 3000 km 左右的速度稳定沿急流方向快速扩散传输, 并通过沉降和下沉气流进入边界层.

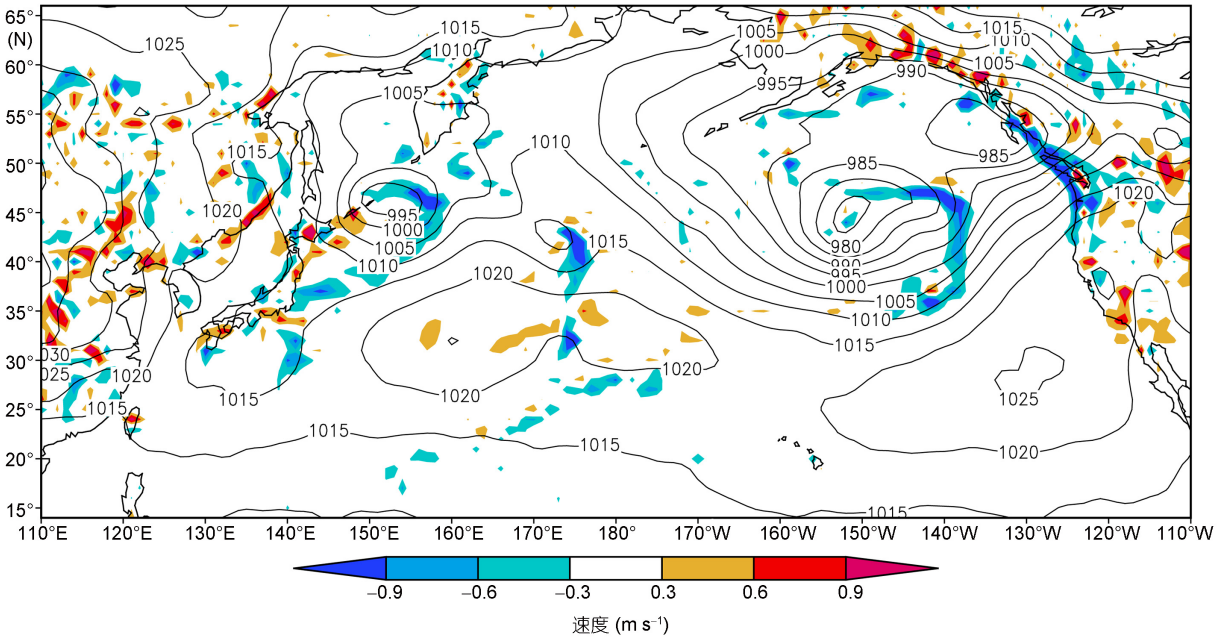


图 4　模拟的 3 月 14 日 12 时海平面气压和 850 hPa 垂直速度

等值线: 海平面气压; 彩色区: 垂直速度, 单位 m s^{-1}

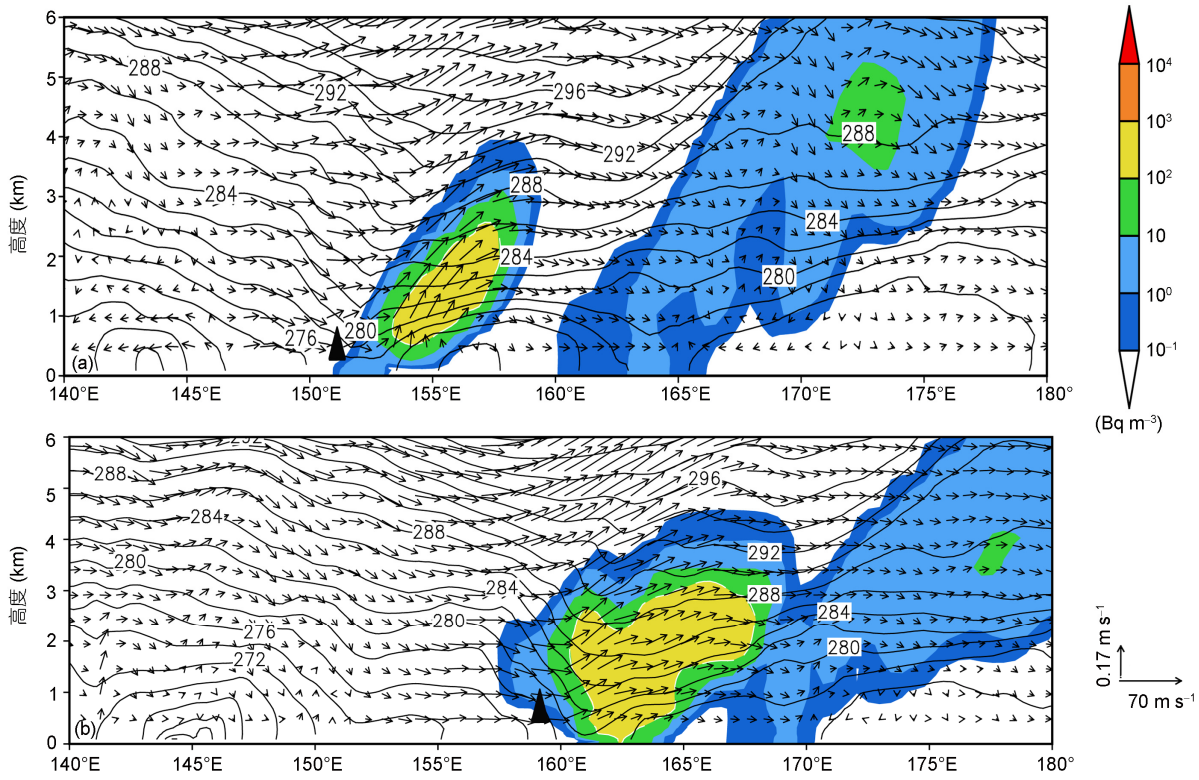


图 5　沿 46°N 模拟的位温(等值线)、放射性核素(彩色区)和风场的垂直分布

图(a)和(b)分别为 2011 年 3 月 14 日 09, 18 时. 黑色三角形表示冷锋位置

3 核污染物近距离(局地)扩散传输高分辨模拟

核污染物的局地扩散传输主要由事故发生区域的中尺度气象条件决定. 试验 1 中由于模拟区域较大, 受计算能力所限, 分辨率较粗, 主要用于分析大尺度气象条件的影响. 为研究局地污染影响, 对事故区域采用较高分辨率重新进行数值模拟. 在水平方向采用两重双向嵌套, 中心点设在(38°N, 150°E), 外层网格距为 12 km, 格点数为 150×150, 对应的区域为日本及附近地区; 内层网格距为 4 km, 格点数为 211×211, 对应区域为日本本州岛中东部. 积分时间是从 2011 年 3 月 12 日 00 时至 2011 年 3 月 17 日 00 时. 垂直分层、物理化学机制、释放源强度位置与试验 1 相同, 但释放源数据的精度提高为 0.1°×0.1°. 称该模拟为试验 2.

福岛核电站所处纬带盛行西风, 在大气环流作用下, 污染物大部分时间将会稳定向东扩散传输. 但气旋过程带来的大风和降水可加快污染物的扩散传输和局地沉降. 同时, 气旋性环流又可使污染物改变传输路径, 甚至对局地造成重复影响.

3 月 12 至 17 日影响日本的天气系统大概可以分为两个阶段. 第一阶段为 3 月 12 日 00 时至 3 月 14 日 12 时, 这个阶段连续有我国境内生成的温带气旋东移影响日本北部地区, 污染物稳定向东输送. 第二阶段为 3 月 14 日 12 时至 3 月 17 日, 这个阶段的气象条件主要表现为日本中部南部有气旋不断东移, 该气旋系统改变了污染物扩散态势, 使污染物直接向西南输送, 对日本南部包括东京在内的城市造成影响, 本节重点对这一过程进行分析.

在 14 日 12 时, 已经东移到日本东北部洋面的北方气旋对放射性污染物扩散的影响逐渐减弱, 同时, 本州岛南部海域出现一个中尺度低压系统(图 7(a)), 并向东偏北方向移动, 且快速加强. 福岛地区刚好位于这两个气压系统之间, 南北风在此地区汇合, 污染物向东扩散的形势尚未发生改变(图 6(a)); 随着北方气旋逐渐东移减弱, 该地区主要被南方气旋系统控制(图 6(b)~(d)), 本州岛东部海域全部受东北风影响, 污染物直接向西南扩散, 影响日本内陆. 在 15 日 06 时, 污染物最远影响到日本南部 139°E 以西地区(图 7(d)). 此时在日本海又有一次气旋出现并东移, 引起大量降水(图 6(d)和(e)), 污染物被沉降到地面, 大气中污染物浓度减少(图 7(e)). 由于缺少日本地区中尺度气象观测资料, 特别是海上观测资料缺乏, 利用卫星云图(图略)对模拟的天气形势特别是降水区与云区进行了比较, 发现模拟结果较合理. 15 日 18 时, 随着气旋的东移(图 6(f)), 该地区的西风减弱被逐渐转为北风后又变为西北风, 污染物对本州岛东南部的影响逐渐减弱(图 7(f)).

根据日本文部科学省的数据, 使用 Onuma Hitachi City 站点(位于福岛东南方)观测的吸收剂量率与模拟结果进行比较. 由于吸收剂量率考虑到的因素较多, 重点对污染物开始影响的时刻进行对比.

图 8 是系统模拟的 ^{137}Cs 在低层大气中的放射性活度浓度(蓝线)与该站点观测的吸收剂量率(红线)的对比图. 可见, 模拟和观测结果均表明日本南部的低压系统会使污染物在 14 日 18 时至 15 日 9 时内影响日本南部地区, 尤其是对 Onuma Hitachi City(图 8)污染物到达的时间, 两者仅相差 1 h 左右, 观测时间与系统模拟结果基本吻合. 虽然 15 日 4 时模拟的第二个峰值滞后于观测 5 h 左右, 且 15 日 9 时后模拟值趋于零, 但总体看, 系统对放射性污染物局地影响的模拟反映了污染物的总体趋势, 表明模拟结果具有较高可信度.

4 讨论

本文建立的耦合模式系统实现了对福岛核事故中的核污染物扩散传输和强度变化的模拟, 但是在采用了一定的假设条件下实现的, 因此其结果还是初步的, 特别是核污染物的实际观测资料缺乏, 对部分模拟结果还较难验证. 在本文建立的耦合模式框架下, 要进一步提高定量化的模拟预报水平, 在进一步改进完善模式系统的基础上, 关键是源项设计, 如泄漏量是随时间变化的, 源项设置中的污染物总量应按时间分级或细化; 对不同的放射性粒子半径应进行分谱, 可对污染物的沉降得到更精确的模拟. 这些问题可从数值模拟、实验室试验和实际例子分析着手进行, 这需要我们下一步深入研究.

福岛核事故发生后, 国际许多机构都发布了核污染扩散数值预报产品, 采用的模式主要以粒子扩散模式为主, 如作为 WMO 和 IAEA 的八大响应中心之一的北京区域环境紧急响应中心即采用 HYSPLIT-4 扩散模式, 而本文中采用的空气质量模式(CMAQ)考虑了干、湿沉降等多种物理过程, 对于

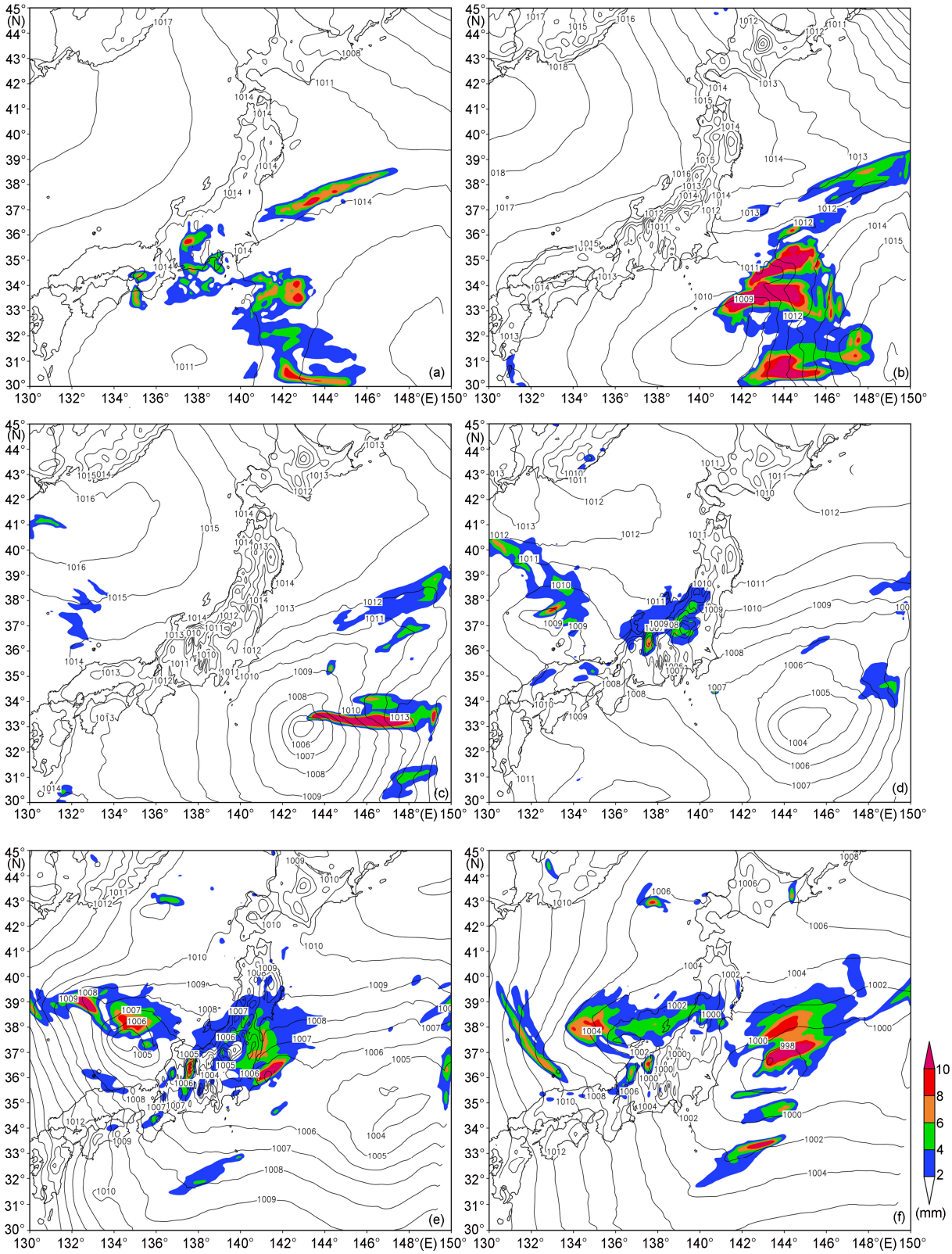


图 6　模式模拟 3 月 14 日 12 时至 15 日 18 时日本地区海平面气压场(黑色实线)及每小时降水(彩色区)

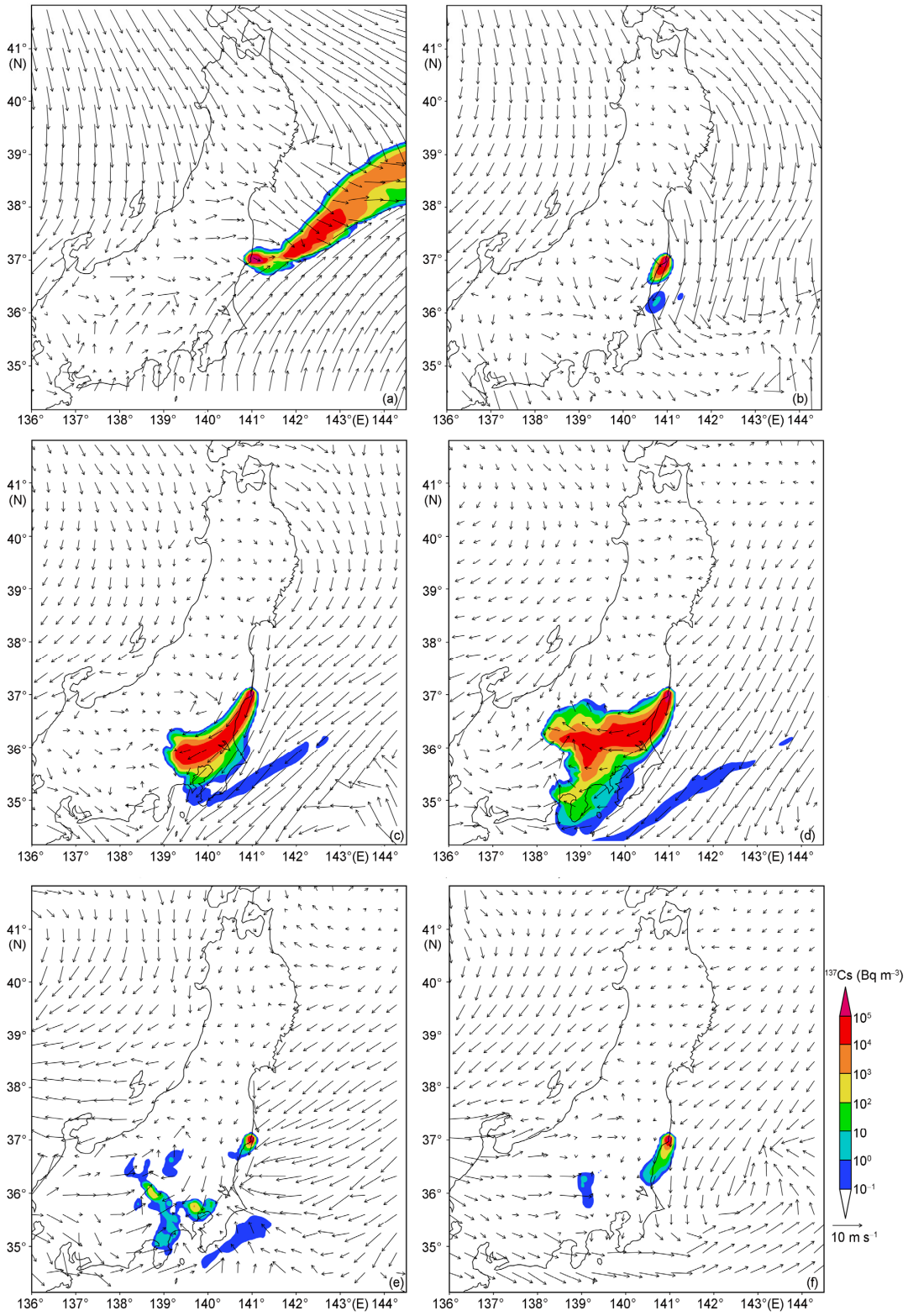


图 7　模式模拟 3 月 14 日 12 时至 15 日 18 时福岛核电站附近泄漏放射性核素 ^{137}Cs 在近地面大气中的放射性活度(彩色区)及风场(矢量)

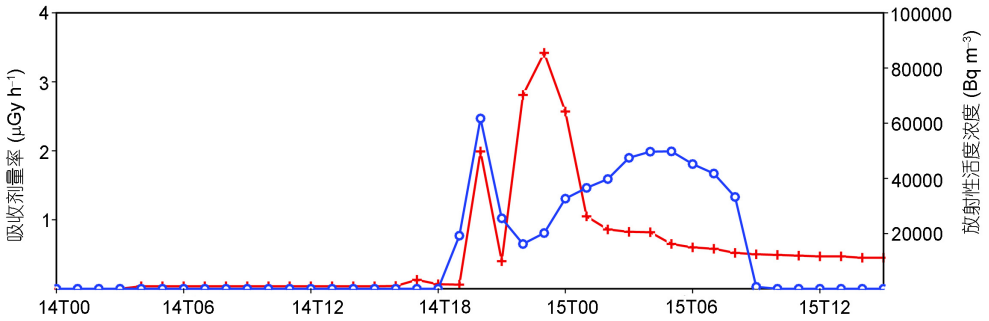


图 8　3 月 12 日 00 时至 17 日 00 时 Onuma Hitachi City 站点观测的吸收剂量率(红线)与系统模拟的 ^{137}Cs 在低层大气中的放射性活度浓度(蓝线)对比图

建立核污染物扩散数值预报系统具有一定的借鉴意义.

福岛核事故虽然对我国没有造成直接影响, 但全国关注. 在国际上对核电安全性忧虑迅速放大. 通过对福岛核事故的模拟研究表明, 放射性污染物主要以向东扩散传输为主, 即使在气旋系统的影响下, 对日本本土的影响时间较短, 从大气条件角度看, 作者认为福岛核电站的选址比较科学. 因此, 在核电站选址时, 不仅要考虑社会经济发展和地理因素, 还需充分考虑天气气候特点. 天气条件和气候背景对污染物的扩散传输、应急防护措施的选择和应急响应行动的组织实施等有着直接影响. 建立科学有效的核污染物扩散传输模拟预报系统, 是认知其发展变化规律的重要科学途径, 也是实施环境紧急响应工作的基础和重要组成部分. 同时, 在核电站周围需要科学规划和建立相应的实时环境监测体系, 为模式系统提供必要的实测数据. 因此, 必须吸取福岛核事故教训, 高度重视核电站环境监测和预报能力建设, 处理好平时和紧急事件处置关系, 做到防患于未然.

5　结论

针对 2011 年 3 月日本大地震引发的福岛核事故, 基于大气模式 WRF 和空气质量模式 Models-3/CMAQ 建立的耦合模式系统, 对核事故中泄漏的放射性污染物中远距离和近距离(局地)扩散传输路径和强度进行了数值模拟, 得到以下主要结论:

(1) 通过核泄漏放射性物质的源项设计, 采用 CMAQ 模式中 $PM_{2.5}$ 作为核污染物的示踪物, 并考虑核污染物扩散、湿沉降以及核污染物自身的干沉降过程, 建立了基于大气模式 WRF 和空气质量模式 Models-3/CMAQ 的耦合模式系统, 对福岛核事故中的核污染物扩散输运路径、范围和强度的模拟结果表明, 耦合模式系统具有较好模拟预报能力.

(2) 福岛核事故发生之后, 受西风带影响, 放射性污染物主要向东部太平洋方向扩散, 5 天后到达美洲大陆, 但浓度已经不足福岛核电站附近的 10^{-7}, 模拟的污染物达到美国的时间和在加州的监测数据基本吻合. 同时发现, 由于高空风速大于低层, 污染物的分布随高度形成向东倾斜的垂直结构.

(3) 春季是日本及附近地区气旋的多发期. 气旋是一个辐合上升系统, 并常带来强降水. 在系统模拟期间, 有三次气旋过程影响日本地区. 模拟结果表明, 气旋系统造成的上升运动使部分污染物进入高层大气, 获得更快的输运速度; 气旋性环流可使污染物改变水平传输路径, 甚至对局地造成重复影响; 气旋大风和降水可加快污染物的扩散传输和局地沉降, 降水会大幅度稀释大气中核污染物的浓度, 但也会使部分污染物沉降在日本本土, 造成长期影响.

参考文献

蔡旭晖, 陈家宜, 康凌. 2000. 大气扩散的随机游走烟团模式及应用. 第八届全国大气环境学术会议论文集. 58–63
费建芳, 王锐, 王益柏, 等. 2009. 一次大雾天气下 $PM_{2.5}$ 二次无机粒子的数值模拟. 大气科学学报, 32: 360–366
高会旺, 黄美元, 周玲, 等. 1997. 酸性污染物欧拉型输送转化模式的研究. 地球科学进展, 12: 422–427
矫梅燕. 2010. 现代天气业务(下册). 北京: 气象出版社. 557–568

卢艳, 费建芳. 2005. 长江中下游地区空气质量的数值模拟研究. 安全与环境学报, 5: 78–82
乔方利, 王关锁, 赵伟, 等. 2011. 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, 56: 887–894
姚素香, 张耀存, 周天军. 2003. 近 50a 春季东亚温带气旋活动频数的气候特征及其变化. 南京气象学院学报, 26: 317–323
姚仁太, 徐向军, 郝宏伟, 等. 2005. 远东地区核风险厂址释放的气载放射性污染物长距离迁移的模拟. 辐射防护, 25: 193–205
王益柏, 费建芳, 黄小刚. 2009. 应用 Models-3/CMAQ 模式对华北地区一次强沙尘天气的研究初探. 气象, 35: 46–53
张美根, 韩志伟, 雷孝恩. 1999. Monte Carlo 多源模式在广东核电站大气环境评价中的应用. 气候与环境研究, 4: 203–209
张军. 2005. 军事气象学. 北京: 气象出版社. 157–172
张彦, 王自发, 郑毅. 2008a. 高空核试验放射性烟云扩散的数值模拟研究. 安全与环境学报, 8: 115–121
张彦, 郑毅, 王自发. 2008b. 基于 RAMS/CFORS II 模式一次低空核试验放射性烟云扩散的数值模拟. 气候与环境研究, 13: 717–726
张颖娴, 丁一汇, 李巧萍. 2012. ERA40 再分析资料揭示的北半球和东亚地区温带气旋生成频率变化. 气象, 38: 646–656
郑毅, 王自发, 黄美元. 2000. 一个大气层核试验放射性碎片长距离输送的三维欧拉模型. 气候与环境研究, 5: 118–128
Byun D W. 1999. Fundamentals of one-atmosphere dynamics for multiscale air quality modeling. In: Science Algorithms of EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality Modeling System, EPA-600/R-99/030. United States Environmental Protection Agency. 5: 1–38
Stohl A, Forster C, Frank A, et al. 2005. Technical note: The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2. Atmos Chem Phys, 5: 2461–2474
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. Atmos Chem Phys, 12: 2313–2343
Uno I, Satake S, Carmichael G R, et al. 2004. Numerical study of Asian dust transport during the springtime of 2001 simulated with the chemical weather forecasting system (CFORS) model. J Geophys Res, 109: 20–24
Wang Y B, Fei J F, Huang X G, et al. 2012. Application of models-3/CMAQ on Asian dust storm. Adv Mater Res, 378–379: 385–388