

聂新旺,王益柏,孙守勋,等. 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,2012,38(10):1182-1188.

# 应用 Models-3/CMAQ 对 2011 年 3 月日本福岛核泄漏的数值研究<sup>\*1</sup>

聂新旺<sup>1</sup> 王益柏<sup>1</sup> 孙守勋<sup>1</sup> 赵 伟<sup>1</sup> 张利军<sup>1</sup> 程小平<sup>2</sup>

1 61741 部队,北京 100094  
2 解放军理工大学气象学院,南京 211101

**提 要:** 2011 年 3 月 12 日,受日本以东地震和海啸影响,福岛核电站发生核物质泄漏。本文采用空气质量模式系统(Models-3/CMAQ),在理想假设条件下,对此次核泄漏事故进行了数值模拟。研究结果表明:模拟期间,核泄漏物质主要影响福岛附近地区和西北太平洋海区;核泄漏物质能扩散至较高的高度,源区核辐射量随高度呈指数减小;核泄漏物质主要通过东北路径和偏东路径影响我国,但核辐射影响极其轻微;Models-3/CMAQ 具有对核泄漏事故的模拟能力。

**关键词:** 核泄漏,数值模拟,Models-3/CMAQ,扩散路径

## Application of Models-3/CMAQ to Radioactive Leak at Fukushima in March 2011

NIE Xinwang<sup>1</sup> WANG Yibai<sup>1</sup> SUN Shouxun<sup>1</sup> ZHAO Wei<sup>1</sup>  
ZHANG Lijun<sup>1</sup> CHENG Xiaoping<sup>2</sup>

1 61741 Troops of PLA, Beijing 100094  
2 Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

**Abstract:** Affected by strong earthquake and tsunami in east Japan, large amounts of radioactivity have been emitted from Fukushima Nuclear Power Plant since 12 March 2011. In this paper, Models-3/CMAQ is used to simulate the radioactive leak under ideal conditions. The results show that the radioactive releases mainly affect the vicinity of Fukushima and the northwest of the Pacific Ocean, the radioactive releases can disperse to higher altitudes, and the concentration of radioactive releases decreases exponentially with height increasing in source region. Moreover, radioactive releases have trivial effect on China through northeastern and eastern paths; and Models-3/CMAQ is capable of simulating radioactive-leak accident.

**Key words:** radioactive leak, numerical simulation, Models-3/CMAQ, dispersion path

### 引 言

2011 年 3 月 11 日,日本宫城县以东太平洋海域(38.0°N、142.9°E)发生里氏 9.0 级特大地震,震源深度 10 km。随后强震引发高达 10 m 的巨大海

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<sup>[1]</sup>。受此次强震海啸影响,福岛核电站遭受重创,其多个反应堆先后发生爆炸,造成大量核泄漏污染物迅速向各地排放。北美、欧洲、非洲和亚洲等地先后监测到微量的人工放射性核

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(41105065)资助  
2011 年 7 月 5 日收稿; 2012 年 5 月 8 日收修定稿  
第一作者:聂新旺,主要从事气象服务保障工作。  
通讯作者:王益柏,主要从事中尺度气象学与环境污染数值模拟研究。Email:wang\_yi\_bai@163.com

素。根据中华人民共和国环境保护部(国家核安全局)发布的全国环境辐射监测结果,3月26日,黑龙江省东北部3个监测点(饶河县、抚远县和虎林县)的气溶胶样品中首次检测到极微量的人工放射性核素碘-131,浓度分别为 $0.83\times 10^{-4}\sim 4.5\times 10^{-4}\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $0.68\times 10^{-4}\sim 6.8\times 10^{-4}\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $0.69\times 10^{-4}\sim 6.9\times 10^{-4}\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (国家标准规定限值为 $24.3\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ );4月2日,包括西藏在内的我国内地所有省(市、区)均已检测到极微量的人工放射性核素碘-131,部分省市还检测到极微量放射性核素铯-134和铯-137。从目前情况来看,福岛核泄漏已受到控制,辐射程度减弱,不会对核电站附近人群造成短期危害,更不会影响到周边国家。但核事故早期应急响应放射性后果评估系统的研究已引起各方广泛关注,其中核泄漏物质的扩散路径和浓度预测是主要内容之一,具有重要的研究意义。

数值方法是定量化评估核泄漏物质扩散路径和浓度预测的重要手段。针对此次核泄漏事故,奥地利中央气象和地球动力研究所(<http://www.zamg.ac.at/wetter/fukushima/>)、挪威大气研究所(<http://transport.nilu.no/products/fukushima/>)、法国辐射防护与核安全研究院([http://www.irsn.fr/FR/popup/Pages/irsn-meteo-france\\_22mars.aspx](http://www.irsn.fr/FR/popup/Pages/irsn-meteo-france_22mars.aspx))等国际组织和研究机构利用数值模拟手段开展了3~7天的核泄漏物质扩散的预测研究。国内也有很多研究机构和学者对此展开了大量研究。乔方利等<sup>[1]</sup>利用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,对此次核泄漏物质的输运扩散路径进行了情景模拟和预测。2011年12月19日,在“全国放射性核污染物扩散传输大气数值模拟和预报技术研讨会”,国内很多相关领域的专家和学者从核物质在大气和海洋中的扩散路径模拟与预测、核物质释放源项分析与风险评估、核事故应急响应与优化控制等领域进行了交流和研讨。目前,针对日本核泄漏事故的大气扩散问题研究多侧重于全球范围的长距离迁移和气候尺度的预测研究,对核泄漏物质的短期、近距离传输扩散问题研究尚少,尤其是没有针对核泄漏物质如何扩散影响中国大陆的相关研究。为此,本文采用新一代空气质量模式系统(Models-3/CMAQ),对日本核泄漏物质在东亚地区的传输扩散进行了情景模拟与评估分析,以期揭示核泄漏物质近距离影响中国大陆的扩散路径与危害程度,并检验空气质量模式系统对核

泄漏事故的模拟能力。

# 1 数值模式

## 1.1 数值模式简介

Models-3/CMAQ 是美国环保局最新一代空气质量模式系统(图 1),其主要由气象模式(MM5 V3.7)、区域空气质量模式(CMAQ 4.6)和排放源处理模块(ECIP)三部分组成<sup>[2-3]</sup>。MM5 V3.7 是一个比较完善的中尺度动力学模式,为 CMAQ 4.6 提供连续的气象场及其他参数。ECIP 模块作为连接排放资料和空气质量模式的桥梁,可以产生排放源小时浓度的三维数据。CMAQ 4.6 是模式系统的核心部分,可用于研究城市和区域尺度对流层臭氧、酸沉降、大气能见度、大气颗粒物及多种污染物的输送和转化过程,其主要由如下几部分组成:ICON 和 BCON 分别为初始和边界值模块;JPROC 为光解速率常数模块;MCIP 为气象化学转换模块,提供模拟区域信息及气象资料等;CCTM 为化学反应机制处理模块,是 CMAQ 4.6 的主体部分,其考虑了扩散和平流过程、云和气溶胶效应、气溶胶干湿沉降及模式流程分析等多物理过程。

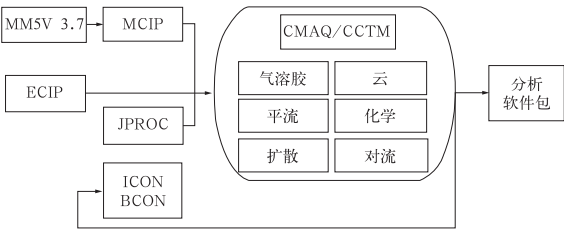


图 1 Models-3/CMAQ 模式系统结构与流程图  
Fig. 1 The structure and computational flow of Models-3/CMAQ

如图 1 所示,Models-3/CMAQ 模式系统的计算流程为:(1)运行 MM5 V3.7 模式,并通过 MCIP 模块将气象资料转换格式供 CMAQ 4.6 使用;(2)运行 ECIP 源排放模块,根据东亚地区污染源清单<sup>[4]</sup>计算模拟区域的背景污染源,为 CMAQ4.6 提供气态污染源资料;(3)运行 CMAQ4.6 的 ICON、BCON 和 JPROC 模块,为 CMAQ/CCTM 提供初始边界条件及光分解率资料;(4)运行 CMAQ/CCTM 模块,计算气态与颗粒污染物的多种物理化学过程。

## 1.2 核泄漏物质在模式中的科学描述

AERO 是空气质量模式(CMAQ)对大气气溶胶动力学的一种有效而精炼的描述<sup>[2]</sup>,其主要考虑了两类多种气溶胶颗粒物种:(1)粗模态颗粒物(粒径在  $2.5 \sim 10 \mu\text{m}$  之间),如 ASOIL、ASEAS 和 ACORS 等;(2)细模态颗粒物(粒径  $< 2.5 \mu\text{m}$ ),如 A25J、AECJ 和 AORGBJ 等。对于不同的颗粒物种,AERO 考虑了不同的物理化学过程。就 A25J 而言,它是一种来自地壳或人类源造成的(unspecified anthropogenic mass)、积聚模态(Accumulation mode)细颗粒物种。AERO 模块中主要考虑了 A25J 的传输、扩散和沉降等物理过程,并假定它不与其他物质发生化学反应。而在不考虑自身衰减的情况下,人工放射性核素也主要受大气传输、扩散与沉降等的影响,因此,可以认为 A25J 具有与核泄漏物质较为相似的物理属性。基于此,本文选取 A25J 作为人工放射性核素的示踪物,来研究核泄漏物质在大气中的扩散路径和影响范围。模式计算时,人工放射性核素(A25J)的排放速率在 CMAQ/CCTM 模块中读取源排放时设定。

## 2 实验设计

### 2.1 气象模式

MM5 V3.7 模式模拟区域为东亚地区,中心经纬度( $45^\circ\text{N}$ 、 $141^\circ\text{E}$ );水平分辨率为  $30 \text{ km}$ ,格点数为  $200 \times 200$ ;垂直方向取  $\sigma$  坐标,为不等距 15 层:1.0, 0.99, 0.98, 0.96, 0.94, 0.91, 0.86, 0.80, 0.74, 0.65, 0.55, 0.50, 0.45, 0.40, 0.35, 0.0;采用松弛侧边界条件;各种物理参数化方案:简冰显式方案、KF 积云对流参数化方案, Pleim-Xiu 行星边界层方案, Pleim-Xiu LSM 陆面模式,辐射上边界条件;启用资料同化技术,分别对风场、温度场和水汽混合比进行 Analysis Nudging 逼近,松弛系数分别为:  $2.5 \times 10^{-4}$ 、 $2.5 \times 10^{-4}$  和  $1 \times 10^{-4}$ ,同化时间设置为三维场变量 360 min,地面场变量 180 min。

模式所需气象强迫场取自 NCEP/NCAR 每日 4 次的  $1^\circ \times 1^\circ$  再分析资料,模拟时间从 2011 年 3 月 12 日 00 时至 3 月 30 日 00 时,每 24 h 启动一次模式计算,提供未来 72 h 的气象要素场,每隔一小时输出一模拟结果。为方便描述,本文均采用世界时。

## 2.2 空气质量模式

CMAQ 4.6 模拟网格在水平方向与 MM5 V3.7 相同,但消除了侧边界的影响,水平格点数为  $197 \times 197$ ;垂直方向与气象模式相同设为 15 层;水平平流和垂直平流均采用 PPM 解法;垂直扩散采用 Crank-Nicolson 解法;考虑干沉降和湿沉降过程;化学机理为改进的 CBM-IV 机理(CB4-AE3-AQ);模拟时间设置同气象模式;除第一次运行外,模式初始场采用前一时次的模拟输出,以保证污染源排放的累积效果。

CMAQ 4.6 所需的污染源排放资料主要取自 ACE-Asia 和 TRACE-P 试验的东亚地区  $1^\circ \times 1^\circ$  污染源清单<sup>[4]</sup>。将福岛核电站泄漏源视为连续点源,认为核泄漏发生在数值模式最接近地面的大气层。根据福岛核电站附近的核泄漏物质的监测数据(<http://fleep.com/earthquake/>),将人工放射性核素(A25J)的排放分为三个阶段:3 月 12 日 00 时至 15 日 15 时、3 月 15 日 16 时至 20 日 12 时、3 月 20 日 13 时至 30 日 00 时。假定各阶段人工放射性核素(A25J)分别以  $1 \times 10^{-3}$ 、 $30 \times 10^{-3}$  和  $10 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$  的定常速率向大气中排放。由于模式物种 A25J 与核物质单位不一致,为便于分析,将 A25J 单位无量纲化(除以全场最高浓度)。在整个过程中不考虑核泄漏物质自身衰减。

## 3 模拟结果及分析

### 3.1 核泄露物质沉降量分析

图 2 为模拟的人工放射性核素沉降量的水平分布情况。由图 2 可知,核泄漏物质主要影响福岛核电站附近区域和西北太平洋海区,除福岛核电站附近地区达 10% 的辐射量级外,其他受影响地区辐射量较小,基本上低于 1% 的辐射级,辐射影响极其轻微。核泄漏发生前期(图 2a~2c),核泄漏物质主体呈带状向东传输至西北太平洋海区,在此期间,受辐射影响范围较小,辐射量相对偏大;后期(图 2d~2f),随着核泄漏物质的进一步扩散,俄罗斯东南部、我国东北地区与东南沿海一带、太平洋西部海域陆续受到核泄漏物质的影响,但辐射程度极其轻微,仅为  $10^{-4} \% \sim 10^{-7} \%$  的辐射级。根据我国环境保护部发布的全国环境辐射监测结果,3 月 26 日黑龙江省东北部监测到极微量人工放射性核素,3 月 29 日

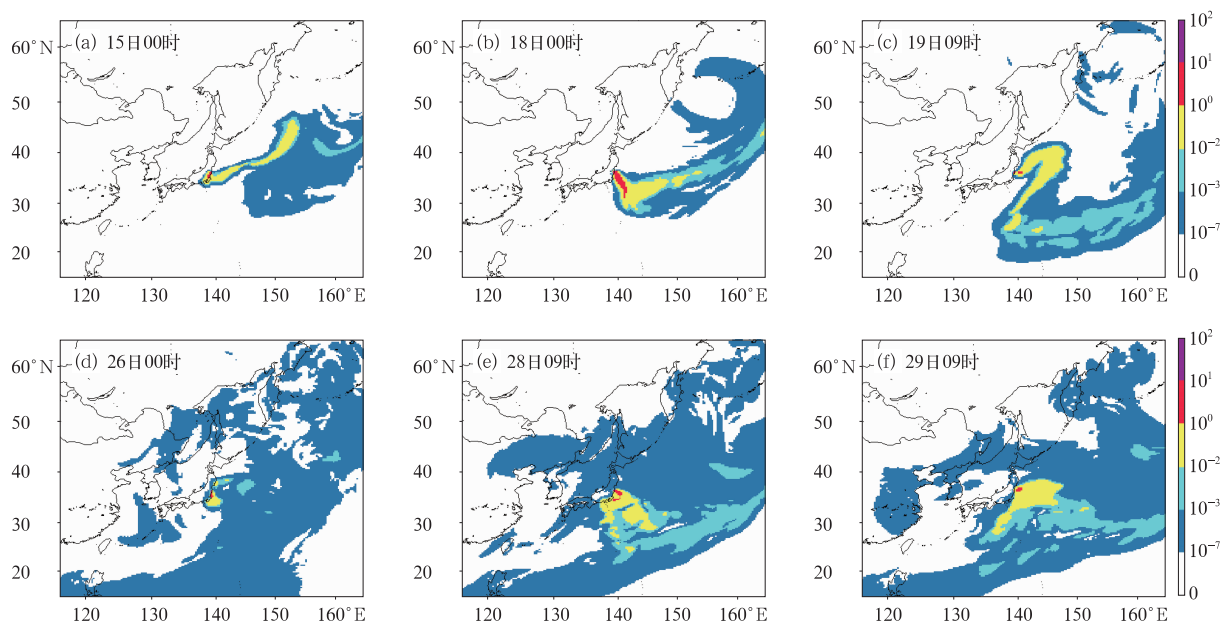


图 2 人工放射性核素(A25J)沉降量水平分布(单位:%)

Fig. 2 Horizontal distributions (unit: %) of the depositional radioactive dust (A25J) at different times

我国东南沿海部分地区监测到极微量人工放射性核素。因此,模拟结果较为真实地反映了此次核泄漏物质的水平扩散过程。

图 3 为模拟的近地面风场分布情况。气象条件尤其是风场对核泄漏物质的传输具有重要的影响,它们的一致对应关系在图 2 和图 3 中有很好的体现。核泄漏发生前期(图 3a~3b),福岛及其以东

海域主要受西北太平洋低压的气旋式风场控制,受其影响,核泄漏物质自西南向东北呈带状传输。随着低压的东移远去,日本东部海域变为反气旋式环流(图 3c),受其影响,核泄漏物质主体折向西南海域传输(图 2c)。3 月 26 日 00 时(图 3d),又一低压系统于日本东部海域形成,我国东北地区至俄罗斯东南部风速较小且风向比较凌乱,此种环流形势下,

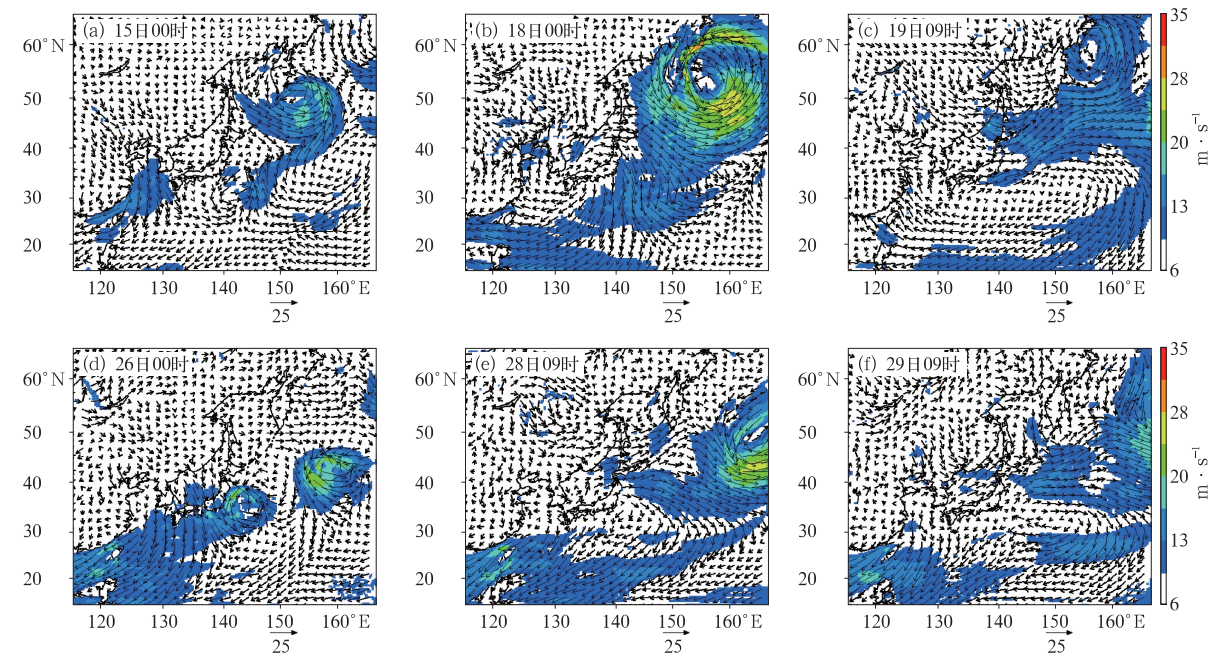


图 3 近地面风场分布

(阴影区为风速 $>9.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的区域)

Fig. 3 Distributions of wind fields near surface at different times

(The shadow area denotes wind speed  $>9.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )



前期已传输至俄罗斯东南部和日本北部的微量核物质容易向我国东北境内扩散(图 2d),并在后期偏北气流的输送下,逐步扩散至我国华北和东南沿海地区(图 2e~2f),但辐射量级极其轻微。此外,对比图 2 与图 3 还可以发现,风速大小与核泄漏物质的沉降

量是一致的负相关关系,风速较大的地区其核物质沉降量低,反之亦然。

3.2 核泄漏物质垂直剖面分析

图4和图5分别为人工放射性核素(A25J)的

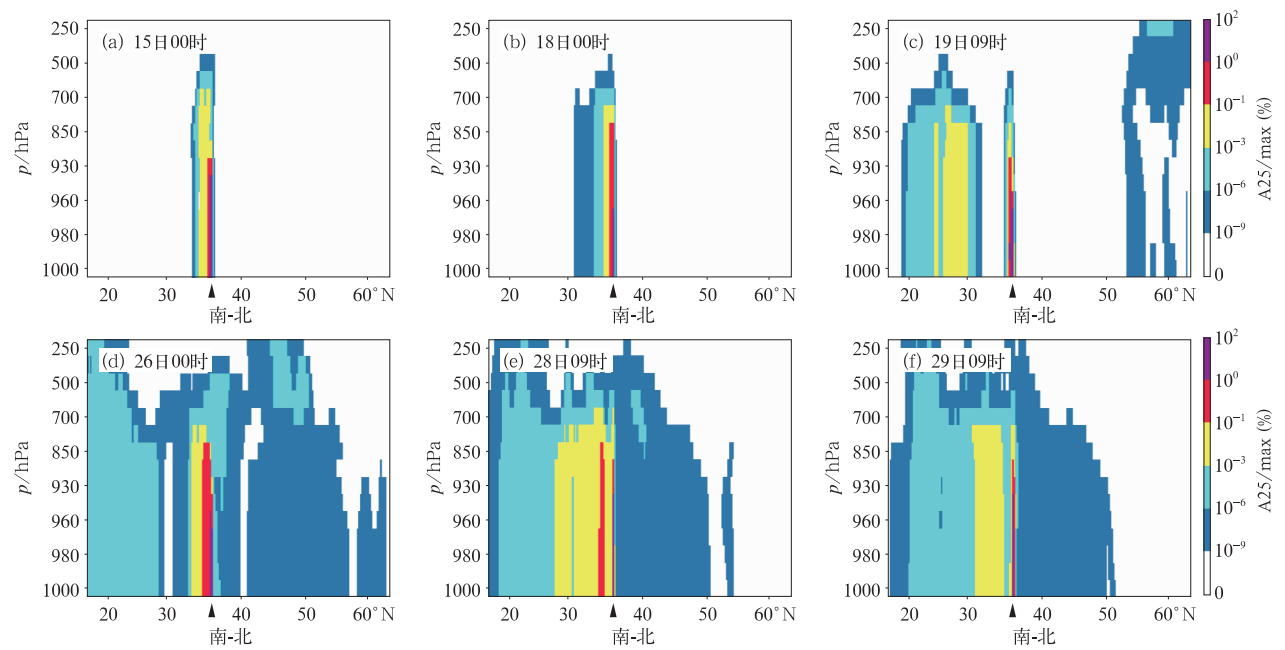


图 4 人工放射性核素(A25J)经向垂直分布(过福岛核电站)  
Fig. 4 Longitudinal vertical distributions of radioactive dust (A25J)  
along Fukushima Nuclear Power Station at different times

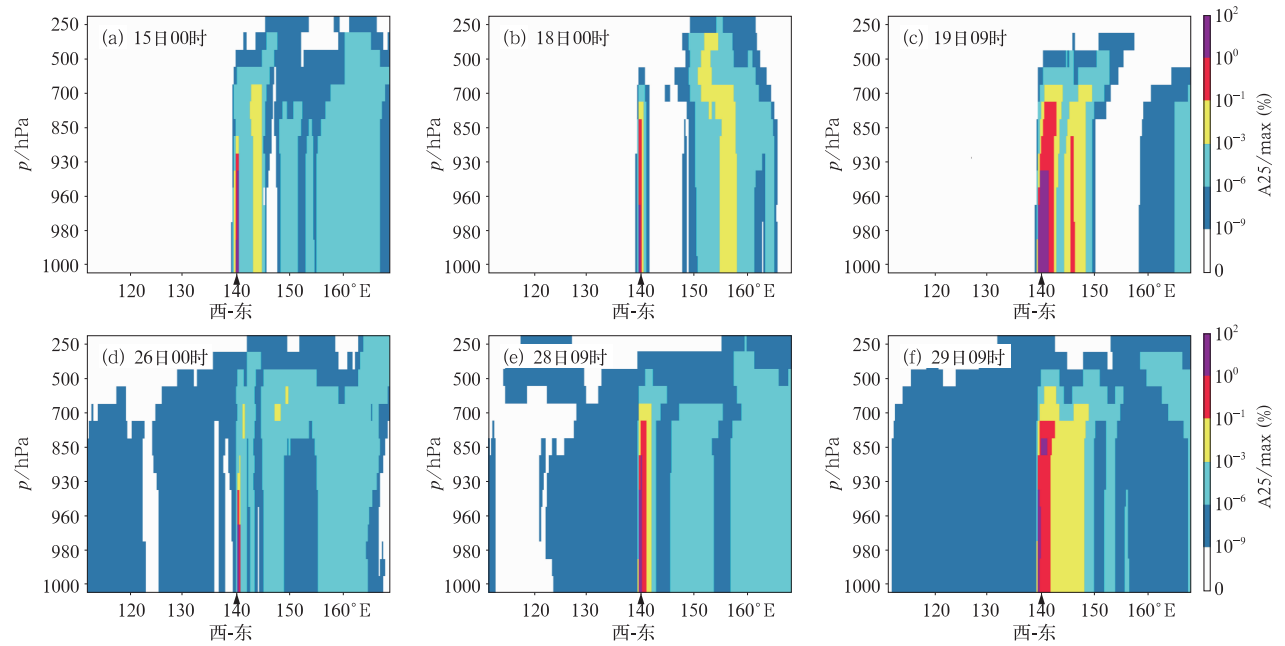


图 5 人工放射性核素(A25J)纬向垂直分布(过福岛核电站)  
Fig. 5 Latitudinal vertical distributions of radioactive dust (A25J)  
along Fukushima Nuclear Power Station at different times

经向、纬向垂直剖面扩散情况(过福岛核电站)。由图可知,核物质自福岛核电站向东西(南北)不断扩散,但以偏南(图 4)、偏东(图 5)向传输为主,且偏东向传输量要大于偏南向传输量。核物质垂直扩散能到达较高的高度,但极值辐射区始终位于福岛核电站周边的近地面层(500 m 高度以下),且随着高度的增加,辐射级呈指数关系迅速降低至极微量级。其中,19 日 09 时(图 4c),除福岛以南地区存在较大范围辐射区外,北面的俄罗斯东南部上空也出现了微量核辐射,辐射量级为  $10^{-6}\% \sim 10^{-3}\%$ ,这为后

期核物质在东亚气旋的作用下进入我国东北地区提供了物质条件。自 26 日 00 时起(图 5d~5f),极微量的核物质在偏东气流作用下(图 2d~2f)逐渐向西扩散至我国东部海域,并最终影响我国东南沿海地区,但辐射量级极其轻微,仅为  $10^{-9}\% \sim 10^{-6}\%$ 。

3.3 核泄漏物质垂直廓线结构

图 6 为日本福岛核电站和我国黑龙江省虎林县的单站人工核放射性核素(A25J)垂直廓线图。由图 6a~6b 给出的两个时次图可知(其他时次图相

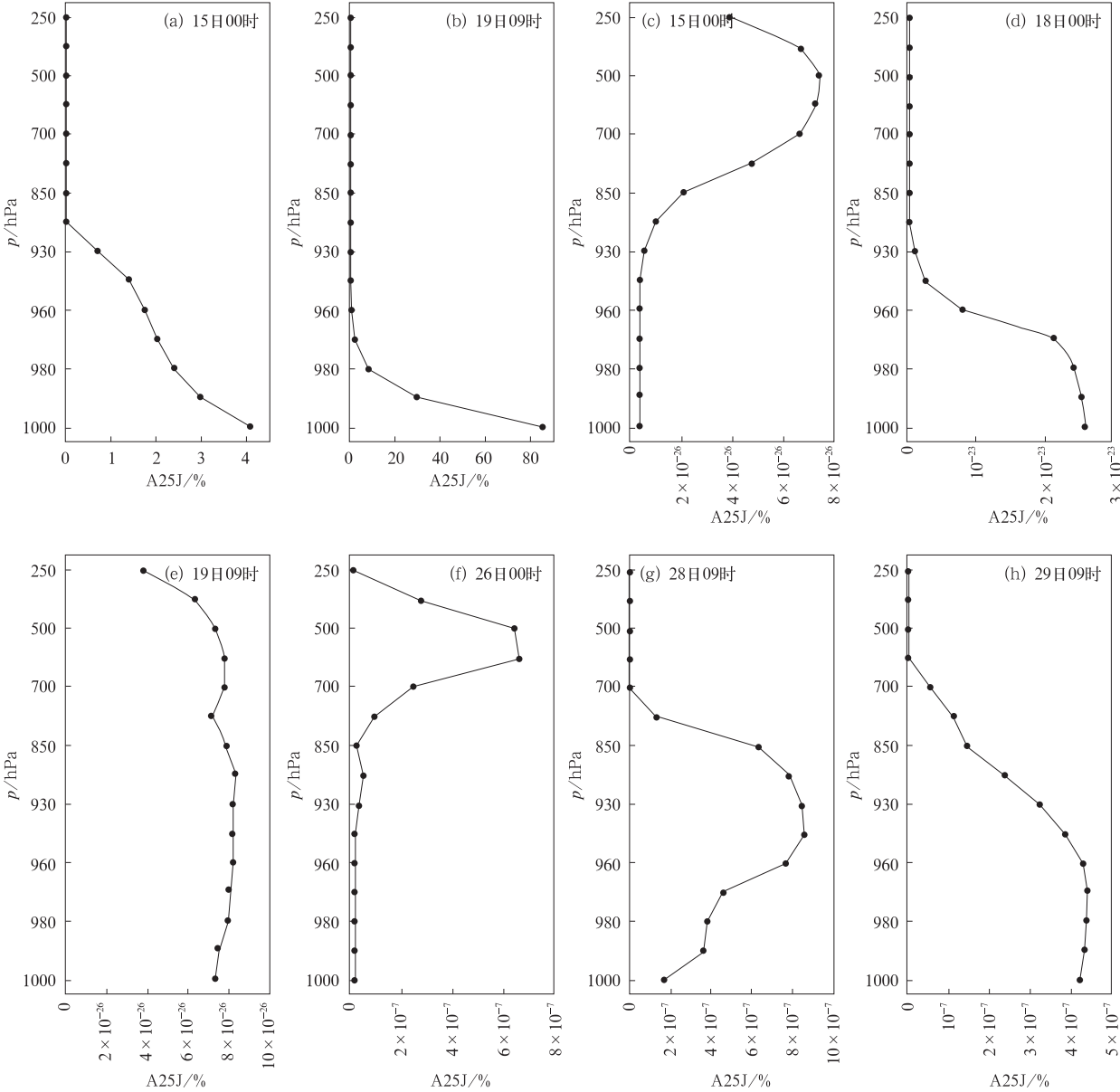


图 6 人工放射性核素(A25J)的垂直廓线图  
(a)~(b)为福岛站,(c)~(h)为黑龙江虎林站  
Fig. 6 Vertical profiles of radioactive dust (A25J) at Fukushima Station (a)–(b), and Hulin Station of Heilongjiang Province (c)–(h) at different times

似), 福岛核电站核物质浓度随高度基本呈指数递减, 其中 19 日 09 时福岛核电站核辐射最严重, 为全过程的最高辐射级。

黑龙江虎林县是我国首次监测到核辐射的地区之一, 分析其辐射量垂直廓线的演变有助于揭示核物质影响我国东北的整个过程。核泄漏发生前期(图 6c), 首先受到核辐射影响的是虎林县高层大气, 但所受核辐射量极其轻微, 辐射级峰值低于  $10^{-26} \%$ , 近地层基本上不受核辐射。随着福岛核泄漏物质的持续扩散与不断沉降, 虎林县近地层核辐射量级增大明显(图 6d), 至 19 日 09 时(图 6e), 整层大气均受到极微量核辐射影响, 但辐射级仍在  $10^{-26} \%$  以下。26 日 00 时(图 6f), 虎林县高层的核物质较前期显著增加, 峰值达  $6 \times 10^{-7} \%$ 。这与虎林县在 3 月 26 日首次监测到人工放射性核素的客观事实非常吻合。此后, 高层核物质不断沉降影响低层, 至 29 日 09 时(图 6h), 虎林县近地层所受核辐射均达到同期最高, 但仍低于  $5 \times 10^{-7} \%$  辐射级。

由此可推知, 福岛核物质首先通过高空环流输送至我国东北上空, 然后从两方面进一步影响我国东部地区: (1) 在高空流场作用下向东北南部、华北等地区扩散; (2) 不断沉降并影响近地层大气。

### 3.4 核泄漏物质扩散路径模型

综合上述分析每小时一次的模式多层结果(图略), 可以得知: 福岛核事故期间, 核物质主要通过东北路径和偏东路径影响我国。图 7 为此次核事故期间核泄漏物质的扩散路径模型示意图, 其清晰地阐述了这两条扩散路径: (1) 东北路径或气旋路

径, 即核物质受东亚气旋影响首先传输至日本北部上空和俄罗斯东南部上空, 然后折向偏西、西南方向进入我国东北地区高空, 此后, 核物质一边在高空偏北气流的影响下向东北南部、华北等地区扩散, 一边不断沉降影响低层大气。(2) 偏东路径或反气旋路径, 即核物质在西北太平洋反气旋环流影响下沿偏东方向传输至我国东南沿海地区; 由于反气旋环流盛行下沉气流, 所以偏东路径主要影响近地层大气。

## 4 结 论

本文采用空气质量模式 (Models-3/CMAQ) 对 2011 年 3 月日本福岛核事故进行了数值模拟, 并从核物质水平沉降分布、垂直剖面分布以及单站核物质垂直廓线结构对模拟结果进行了详细分析。通过分析, 主要得出如下结论。

(1) 模拟结果较为真实地反映了此次核扩散过程。模拟期间, 核泄漏物质主要影响福岛核电站附近区域和西北太平洋海区, 其他地区辐射量较小, 我国所受辐射影响极其轻微。

(2) 核物质能垂直扩散至较高的高度, 源区极值辐射区始终位于福岛核电站周边的近地面层, 随着高度的增加, 辐射级呈指数关系迅速降低。

(3) 提出了模拟期间福岛核物质扩散路径模型, 指出福岛核泄漏物质主要通过东北路径(高空路径)和偏东路径(近地层路径)影响我国。

最后, 为提高模拟的定量化水平, 下一步将采用更精确的实际监测数据作为核物质泄漏源进行模拟。

## 参考文献

- [1] 乔方利, 王关锁, 赵伟, 等. 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, 2011, 56(12): 964-971.
- [2] Binkowski F S. Science algorithms of the EPA Models-3 Community Multi-scale Air Quality (CMAQ) Modeling System [P]. Washington D C: United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, 1999, EPA-600/R-99/030.
- [3] 王益柏, 费建芳, 黄小刚. 应用 Models-3/CMAQ 模式对华北地区一次强沙尘天气的研究初探[J]. 气象, 2009, 35(6): 46-53.
- [4] Streets D G, Bond T C, Carmichael G R, et al. A inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108. doi: 10.1029/2002JD003093.

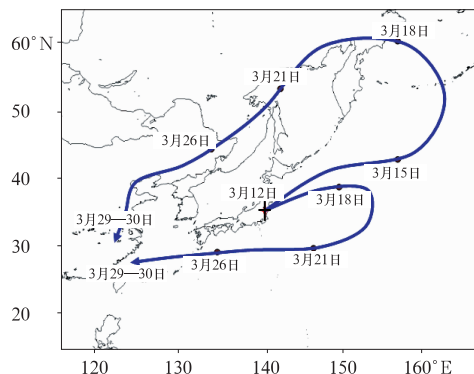


图 7 核物质扩散路径模型

(图中, “+”为福岛核电站位置)

Fig. 7 Schematic dispersed paths of radioactive dust

(Where “+” denotes Fukushima Station)