基于拉格朗日混合单粒子轨迹模式（HYSPLIT）的核污染物扩散数值预报技术

王广杰 沈 红 李 娟 兰伟仁 管维彪
（61741 部队 北京 100082）

摘要 本研究利用拉格朗日混合单粒子轨迹模式(HYSPLIT)开展了核污染物数值预报试验。欧洲示踪试验和虚拟事故情景下的模拟预报试验结果表明，HYSPLIT 模式模拟的 1 h 内轨迹最小绝对误差约为 0.2°，该模式可以有效地预报核污染物的扩散轨迹。模拟轨迹误差主要受风向和风速的影响，且初始状态误差会使轨迹模拟的误差随着预报时效增加而逐渐增大；对于单次轨迹模拟，模式模拟轨迹会存在偏差，但在一定时间范围内，轨迹模拟可以很好反映示踪剂在释放后空间范围内整体的分布特征；利用大气扩散模式 HYSPLIT 和中尺度天气预报模式（WRF），可以实现区域核污染物的数值预报，模式可以预报出事故区域核泄漏物质的扩散路径和浓度分布。

关键词 拉格朗日混合单粒子轨迹模式（HYSPLIT），核污染物，欧洲示踪试验，数值预报
中图分类号 TL99
DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0074
引用该文：
王广杰, 沈红, 李娟, 等. 基于拉格朗日混合单粒子轨迹模式(HYSPLIT)的核污染物扩散数值预报技术[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2024, **42**(2): 020702. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0074.
WANG Guangjie, SHEN Hong, LI Juan, *et al*. Research on numerical prediction technology for nuclear pollution dispersion based onhybrid single particle Lagrangian integrated trajectory (HYSPLIT) model[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2024, **42**(2): 020702. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0074.

Research on numerical prediction technology for nuclear pollution dispersion based on hybrid single particle Lagrangian integrated trajectory (HYSPLIT) model

WANG Guangjie SHEN Hong LI Juan LAN Weiren GUAN Weibiao
(*The PLA Unit 61741, Beijing 100082, China*)

ABSTRACT Due to the lack of research on prediction technology for atmospheric diffusion of nuclear pollution in China, this study used the hybrid single particle Lagrangian integrated trajectory (HYSPLIT) model to perform numerical prediction tests of nuclear pollution. Analyzing the European tracer test and conducting simulation prediction tests under a virtual accident scenario led to the following conclusions: The HYSPLIT model exhibited a minimum absolute error of approximately 0.2° in simulating trajectories within the first hour. The model can

基金资助：国家重点研发计划项目（2018YFC1506704）和国家自然科学基金项目（41475094）资助
第一作者：王广杰，男，1992 年 3 月出生，2017 年于国防科技大学获得硕士学位，工程师，主要从事数值天气预报工作，E-mail: wanggj2015@nudt.edu.cn
收稿日期：初稿 2023-09-06；修回 2023-12-04
Supporteded by the National Key R&D Program of China (2018YFC1506704) and the National Natural Science Foundation of China (41475094)
First author: WANG Guangjie (male) was born in March 1992, and obtained his master's degree from National University of Defense Technology in 2017. Now he is mainly engaged in numerical weather prediction as an engineer. E-mail: wanggj2015@nudt.edu.cn
Received 06 September 2023; accepted 04 December 2023

effectively predict the diffusion trajectory of nuclear pollution. The trajectory simulation error primarily arises from variations in wind direction and wind speed. Additionally, the initial state error progressively amplifies the trajectory simulation error with an increase in forecast lead time. For a single trajectory simulation, the model simulation trajectory will have deviation; however, within a certain time range, the trajectory simulation can well reflect the overall distribution characteristics of the tracer in the spatial range after release. Using the atmospheric diffusion model HYSPLIT and the regional high-resolution model WRF (weather research and forecasting), a numerical prediction of regional nuclear pollution can be realized. The model can predict the dispersion path and concentration distribution of nuclear leakage substances in the accident area.

KEYWORDS Hybrid single particle Lagrangian integrated trajectory (HYSPLIT) model, Nuclear contaminants, European tracer test, Numerical prediction

CLC TL99

核污染物扩散具有扩散性强、影响范围广、辐射性强烈等特点，对人类健康、大气海洋环境有着极为严重的危害[1-3]。尤其是2011年日本福岛发生的核电站泄漏事故，核泄漏放射性物质随风和海水扩散到世界各地，给全球各国造成了不同程度的影响，这也使人们迫切意识到发展核污染物扩散预报技术的重要意义。随着高性能计算机、数值同化技术、预报技术和大气扩散预测模拟技术的迅速发展，模式计算时间不再成为主要的制约因素，这使得采用高分辨率的数值天气预报和污染扩散模式相结合的方式实时预测和评价污染物的传输、扩散和干湿沉降特征，逐渐成为现实可行的方案[4-5]。目前，在核污染物的业务预报系统中，拉格朗日混合单粒子轨迹模式（Hybrid single particle lagrangian integrated trajectory model，HYSPLIT）和拉格朗日粒子扩散模式（FLEXible PARTicle dispersion model，FLEXPART）等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、芬兰气象局、挪威大气研究所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相应的短期放射性污染物扩散态势的预测。

国内发展的核应急预报系统在很大程度上借鉴了国外的核应急预报方法。然而，当前国内外的预报方法主要依赖于全球中期数值天气预报结果，而没有使用现有的业务化运行的区域中小尺度天气预报模式。这导致其对气象要素尤其是风场的预报准确率低于先进的区域数值预报系统。关于核生化事件的预报技术研究，国内目前还缺乏切实有效的预报手段，或者说预报能力还相当有限，比较缺乏这方面的预报和研究经验，相关工作刚刚起步。国外在此方面的研究虽然较早，但对外报道的内容较少，而且这些方面的有些研究都是保密的，尤其是在核生化武器使用产生的放射性沾染和危险生化污染研究方面更是如此。因此，国家迫切需要开展核生化污染大气扩散预测技术研究，这对于提高后果评估效果、应急响应时效以及突发核生化污染事故的科学预防具有重要的理论价值和现实意义。

本研究利用HYSPLIT模式和WRF（Weather research and forecasting）模式进行核污染物数值预报研究，对HYSPLIT模式模拟核污染物扩散的有效性进行了验证，并基于HYSPLIT模式和WRF模式进行了虚拟事故情景下的模拟预报测试。

1 模式简介

1.1 WRF模式

新一代中尺度预报模式WRF因具有维护简单、使用方便、可移植开发等优点而被众多气象部门和机构广泛应用，它主要是由美国国家环境预报中心（National Centers for Environmental Prediction，NCEP）、美国国家大气研究中心（National Center for Atmospheric Research，NCAR）联合其他一些大学共同开发研究。该模型可用于两种方案，即研究用（ARW）和业务用（NMM），本研究采用ARW方案。ARW采用显式分离的欧拉模式，垂直方向有两种坐标系可选：气压坐标和高度坐标。温度和气压通过热动力方程进行诊断。该模型在水平方向上采用Akiwa C型网格和3阶Runge-Kutta时间分段积分方案。物理过程涉及积云对流、辐射、微物理过程、行星边界层和陆面过程。此外，用户可自行设定模式的水平分辨率、垂直分层、模拟区域以及物理参数化方案。

1.2 HYSPLIT模式

HYSPLIT模式是一种由澳大利亚和美国共同研发的拉格朗日轨迹模式[6-7]。因为该模式不仅具有复杂的输送、扩散和沉降功能，还支持多种气象因素输入场、而且可以根据不同类型污染物排模拟多种物理过程。因为其优越性该模型已被广泛应用于多种污染物的研究中。HYSPLIT模式的输出产品包括污染粒子扩散位置、污染物扩散轨迹和污染浓度分布。目前，HYSPLIT模拟系统的最新应用包括：模拟大气示踪剂释放实验、放射性核素扩散、野火烟雾、火山灰、汞和风尘等的扩散。HYSPLIT模式采用烟团或微粒方法，不仅可以计算轨迹，还可以模拟复杂的扩散和沉降过程。模式运行时需要输入规则网格化的气象数据场，其中气象数据支持极射侧面、兰勃托和麦卡托三种正方形地图投影坐标。空气污染物浓度计算将污染物质量与烟团、微粒或两者结合的排放相联系。通过垂直系数廓线、风切变和风场水平变形，计算扩散率。对于烟团扩散过程和微粒扩散过程，有不同的计算方式，前者是在特定的网格点上计算，而后者按网格平均计算。

1.2.1 平流计算

为了计算扩散，拉格朗日模式采用微粒或烟团方法来独立计算微粒的平流。首先，将气象数据（如U、V、W）插值到模式内部的规则网格上。然后，根据这些数据计算微粒或烟团的轨迹以测试模式的平流分量。最后，从初始位置和第一猜测位置的三维速度矢量的平均值计算微粒或烟团的平流[8]。第一猜测位置如式（1）。

$$P'(t+\Delta t)=P(t)+V(P,t)\Delta t \tag{1}$$

式中：$P(t)$为初始位置；$P'(t+\Delta t)$为第一猜测位置；$V(P,\ t)$为速度矢量初始平均值；Δt为积分时间步长，它在模拟期间可以变化。

最后猜测位置如式（2）。

$$P(t+\Delta t)=P(t)+0.5[V(P,t)+V(P',t+\Delta t)]\Delta t \tag{2}$$

式中：$P(t+\Delta t)$为最后猜测位置；$V(P',\ t+\Delta t)$为速度矢量在第一猜测位置的平均值。

1.2.2 扩散计算

HYSPLIT模式在计算污染物扩散时使用了一种混合方法，即在水平方向和垂直方向上采用不同的扩散模型，垂直方向上采用微粒型扩散，这样可避免在该方向上积分的不连续性；在水平方向上采用烟团型扩散，通过在释放时段内定时地释放污染物烟团来模拟其污染源，每个烟团包括适当比例的污染物质量，烟团按照其中心位置的轨迹进行平流，而烟团尺度随时间的扩展说明湍流大气的弥散性。水平方向采用该方法不仅可以减小粒子数目从而减小计算量，而且对于水平分布也具有足够的代表性。

1.2.3 沉降计算

HYSPLIT模型可以同时考虑干沉降、湿沉降和放射性衰减三种不同的污染耗散机制。干沉降被明确定义为一种沉降速度，或者在微粒扩散情况下，可等效为按重力沉降速度计算，或利用阻尼方法和地表面特性相关知识计算。虽然沉降不会因为放射性衰减而发生，但沉降的放射性污染物会发生衰减，因此沉降量在每个时间步长都需要进行放射性衰减作用的调整。

干湿沉降过程的总沉降可表示为多个时间常数项的指数之和，这些时间常数被加总得到时间步长的总沉降如式（3）。

$$D=m\{1-\exp[-\Delta t(\beta_{\mathrm{dry}}+\beta_{\mathrm{gas}}+\beta_{\mathrm{inc}}+\beta_{\mathrm{bel}})]\} \tag{3}$$

式中：D代表一个时间步长Δt内的总沉降；m是微粒或者烟团污染物的质量；时间常数项β_{dry}为干沉降；β_{gas}为气体湿清除；β_{inc}为云中微粒湿清除；β_{bel}为云底以下的微粒湿清除。

1.3 WRF与HYSPLIT耦合

在WRF模式与HYSPLIT模式耦合时，需要从HYSPLIT模式中单独分离出气象数据处理模块，并与WRF模式输出的数据处理相结合形成相对独立的数据接口模块，经过该模块将气象预报数据处理为ARL压缩格式，提供给HYSPLIT模式使用。HYSPLIT模式的水平分辨率与WRF模式水平分辨率相同。本模块中输入HYSPLIT模式的WRF预报要素包括：10 m风速、2 m温度、海平面气压、地面气压、降水等二维要素和高度、垂直速度、相对湿度等三维要素。

2 试验分析

2.1 欧洲示踪试验

2.1.1 试验设计

本试验气象驱动场采用的是NCEP制作发布的全球再分析资料（Final Operational Global Analysis data，FNL）数据集。该数据集的空间分辨率为2.5°×

2.5°，时间分辨率为每6 h，每天4个时次。FNL数据集提供给大气扩散模式HYSPLIT使用的气象要素包括：大气位势高度、温度、风场、垂直速度、相对湿度等三维要素和降水、地面2 m温度、10 m风场等二维要素。

欧洲长距离示踪试验ETEX试验[9-11]采集了两种示踪剂(PMCH/PMCP)的释放，释放位置是Monterfil，48°03′30″N，2°00′30″W，在释放3 d后开始采样，采样网由遍布欧洲大部分地区的168个地面采样站组成。为了进行释放后的轨迹分析及气象补充观测，试验期间在不同时间启动等容气球(CVB)，以跟踪离开源位置的轨迹。以下通过对等容气球以及释放过程的轨迹模拟，验证HYSPLIT模拟结果的有效性。

2.1.2 试验结果

(1)正向轨迹的模拟及分析

以ETEX试验期间等容气球的数据为对象，采用FNL数据为驱动数据，使用HYSPLIT对等容气球释放后的轨迹进行模拟，同时对模拟轨迹及等容气球的轨迹进行比较分析。

选择比较的等容气球释放时间为1994年11月14日。图1是欧洲区域1994年11月14日12:00Z地面气压场和地面流场分布；图2是欧洲区域1994年11月14日18:00Z地面气压场和地面流场分布。可见所选试验时间内，等容气球释放位置所在区域主要为低压控制，试验期间以偏南风为主。

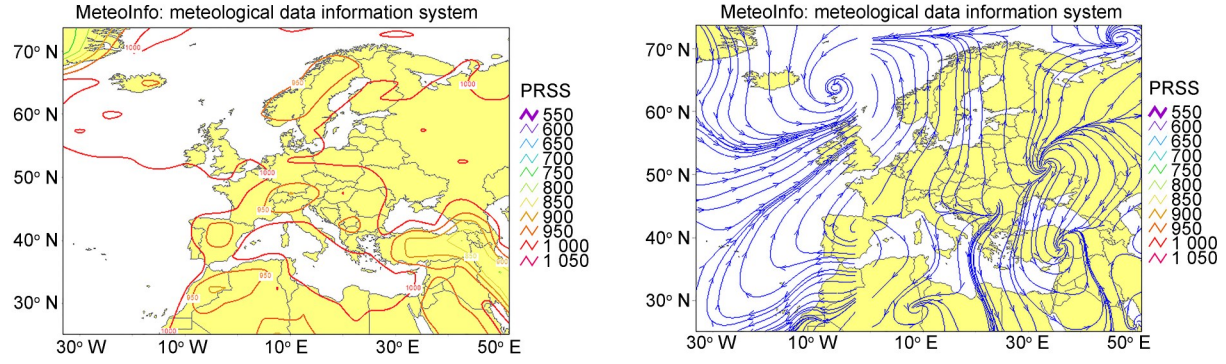


图1 地面气压场和地面流场(1994年11月14日12时)

Fig.1 Surface pressure field and ground flow field (12:00 UTC, November 14, 1994)

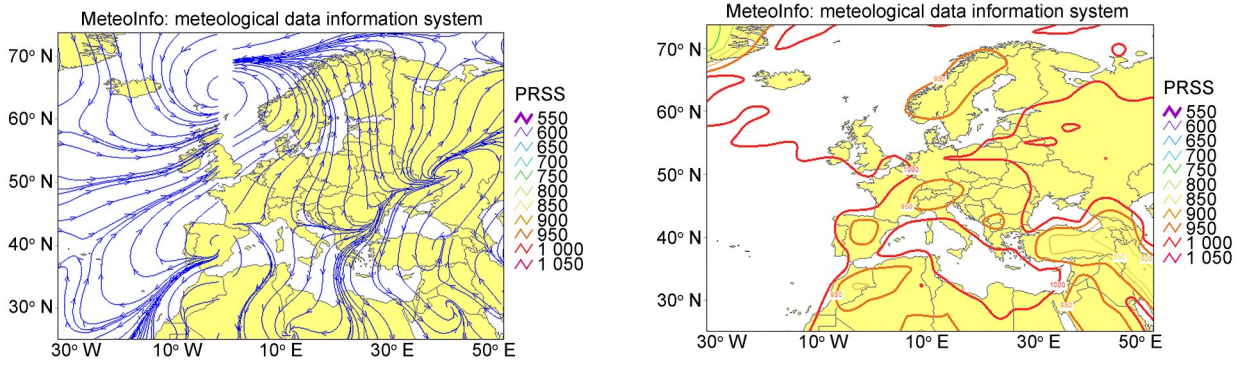


图2 1994年11月14日18时地面气压场和地面流场

Fig.2 Ground pressure field and ground flow field (18:00 UTC, November 14, 1994)

HYSPLIT正向轨迹模拟是为研究释放物质所在位置的气团在释放后迁移的路径，可以对扩散到达区域进行定性分析。以下采用ETEX中三次等容气球释放观测的数据(等容气球的观测数据为随机抽取，但为了更具有代表性和普遍性，采用了不同时间段的观测数据)，对其进行模拟，同时对轨迹模拟结果分别进行讨论分析，为HYSPLIT的实际使用提供参考建议。

案例1：ETEX等容气球轨迹模拟（图3~图5）

释放位置：MONTERFIL（lon：－2.01；lat：48.06；height：90 m）

释放时间：1994年11月14日13时02分

模拟时间：1 h

驱动数据：FNL数据

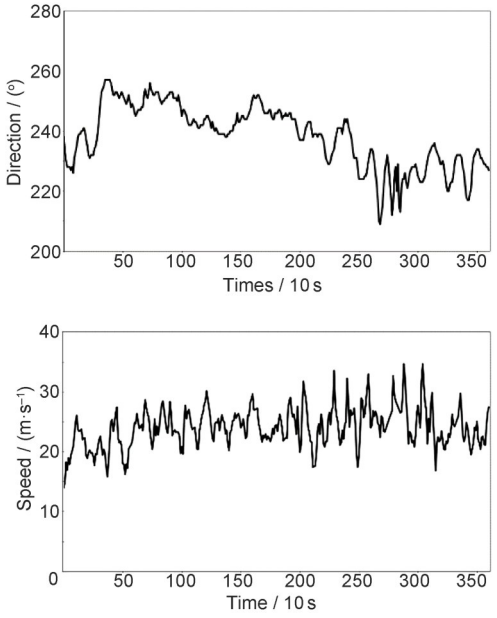


图 3 等容气球风向、风速时间序列

Fig.3 Isovolume balloon wind direction, wind speed time series

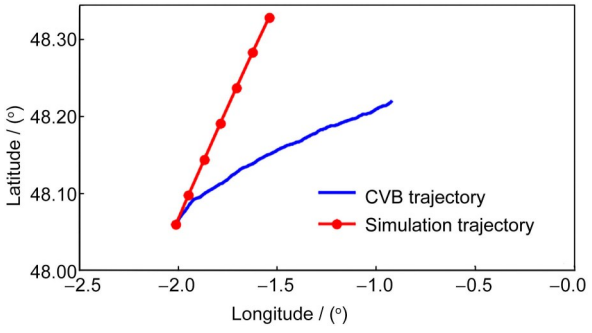


图 4 等容气球轨迹与模拟轨迹比较

Fig.4 Comparison of isovolume balloon trajectories with simulated trajectories

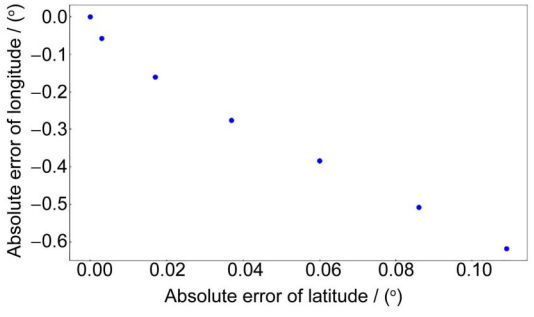


图 5 模拟轨迹的绝对误差分布

Fig.5 Absolute error distribution of simulated trajectories

案例2：ETEX等容气球轨迹（图6~图8）

释放位置：MONTERFIL（lon：－2.01；lat：48.06；height：90 m）

释放开始时间：1994年11月14日15时38分

模拟时间：2 h

驱动数据：FNL数据

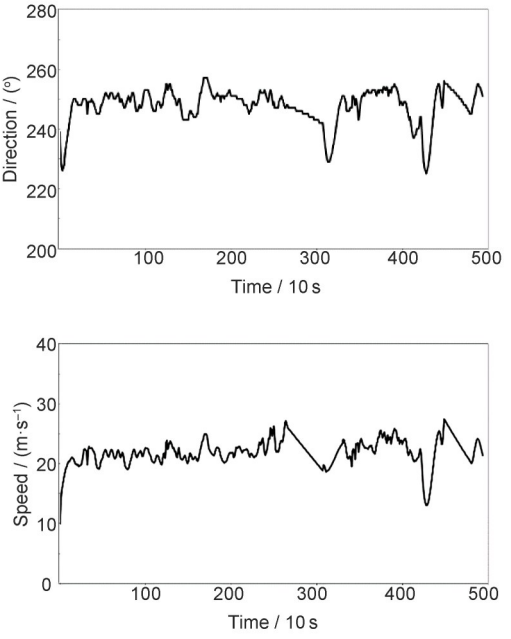


图 6 等容气球风向、风速时间序列

Fig.6 Isovolume balloon wind direction, wind speed time series

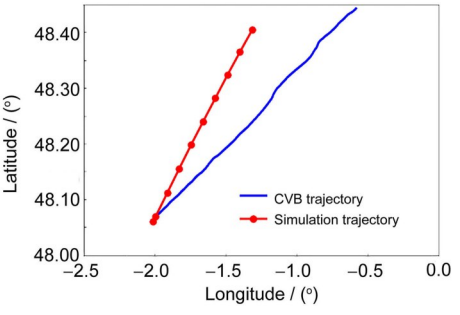


图 7 等容气球轨迹与模拟轨迹比较

Fig.7 Comparison of isovolume balloon trajectories with simulated trajectories

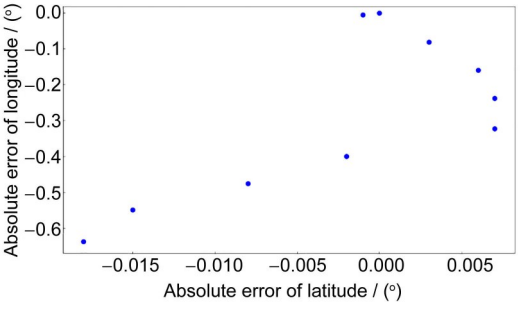


图 8 模拟轨迹的绝对误差分布

Fig.8 Absolute error distribution of simulated trajectories

案例3：ETEX等容气球轨迹（图9~图11）

释放位置：MONTERFIL（lon：－2.01；lat：48.06；height：90 m）

释放开始时间：1994年11月14日19时10分

模拟时间：1 h

驱动数据：FNL数据

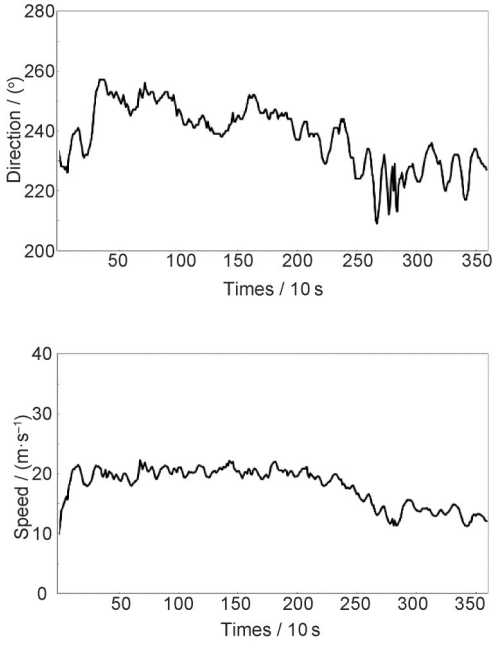


图 9 等容气球风向、风速时间序列

Fig.9 Isovolume balloon wind direction, wind speed time series

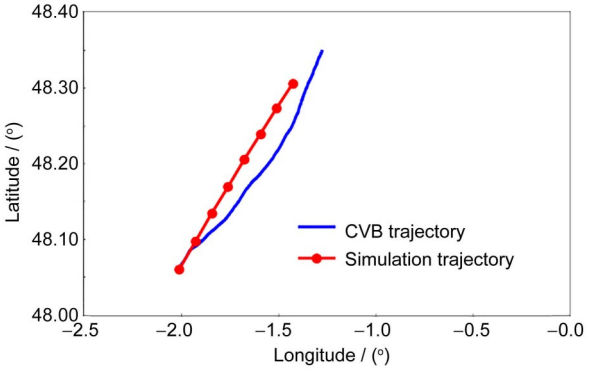


图 10 等容气球轨迹与模拟轨迹比较

Fig.10 Comparison of isovolume balloon trajectories with simulated trajectories

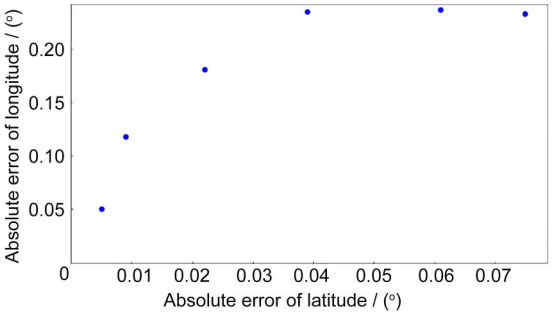


图 11 模拟轨迹的绝对误差分布

Fig.11 Absolute error distribution of simulated trajectories

通过对三次等容气球(CVB)释放轨迹的模拟(图4、图7、图10)可以发现，第三次CVB的模拟结果与实际结果最为接近(图10)，第一次CVB模拟结果与实际结果的差异最大(图4)。通过对三次轨迹模拟与实际观测数据的绝对误差(图5、图8、图11)进行分析，第一次模拟的轨迹末端绝对误差为(lat：0.11°；lon：−0.62°)、第二次模拟的轨迹末端绝对误差为(1 h：lat：−0.323°；lon：0.007°；2 h：lat：−0.6°；lon：−0.018°)、第三次模拟的轨迹末端绝对误差为(lat：0.075°；lon：0.233°)，三次模拟1 h内轨迹模拟最小的绝对误差约为0.2°。结合等容气球风向、风速时间序列图(图3、图6、图9)和模拟轨迹绝对误差分布图(图5、图8、图11)，可以看出模拟轨迹误差主要受到风向、风速的影响，且初始状态误差会使轨迹模拟的误差随着预报时效增加而逐渐增大，因此，进行轨迹模拟时，可以通过区域模式提高气象场的分辨率或通过资料同化方法提高气象场的准确度，从而减小轨迹模拟的误差。

(2)释放期间轨迹模拟分析

以ETEX第一次试验为模拟对象，对采样点结果进行分析，筛选其中采样结果不为0的点作为释放期间轨迹潜在到达的位置进行比较(图12、图13)。

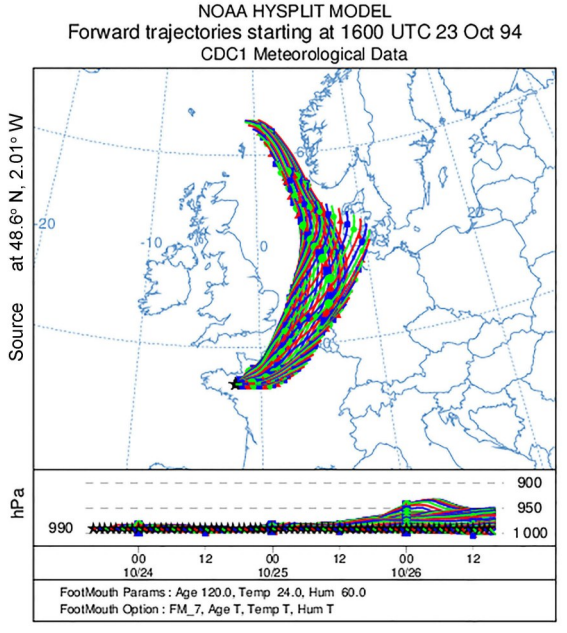


图 12 释放后轨迹分布

Fig.12 Distribution of trajectories after release

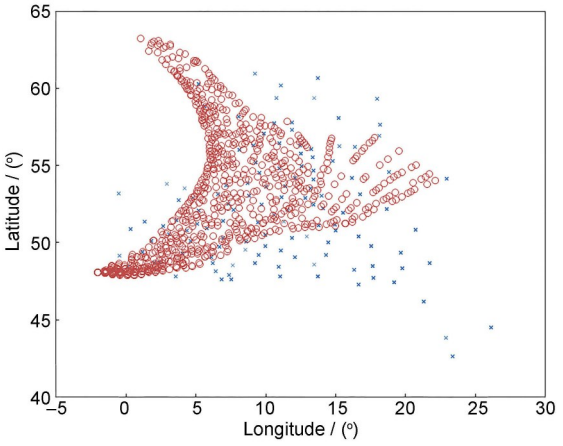


图 13 释放后轨迹通过的位置及浓度值高于0.0的位置(×：轨迹模拟经过位置；○：轨迹经过位置)

Fig.13 Position of the released trajectory and the concentration value above 0.0(×: the position of the simulation trajectory; ○: the position of the trajectory)

第一次释放持续约12 h，在使用HYSPLIT模型模拟连续释放轨迹时，每1 h释放一条轨迹，同时考虑到需对整个烟羽扩散范围进行统计，在实际模拟时释放72 h，以保证最初释放的12条轨迹可以充分反映扩散所到达的空间范围。

第一次释放期间的状况：

释放位置：Monterfil(48°03′30"N；2°00′30"W)

释放开始时间：1994年10月23日16时

释放结束时间：1994年10月24日03时50分

通过对整个释放过程的轨迹模拟（图12、图13）可知，释放轨迹所经过的区域基本覆盖浓度结果不为0的采样点分布区域，南侧采样点多为低浓度值。说明对于单次轨迹模拟，模型模拟轨迹会存在偏差，但在一定时间范围内，轨迹模拟可以很好反映示踪剂在释放后空间范围内整体的分布特征。

2.2 虚拟事故情景下的模拟预报

2.2.1 试验设计

为了测试模拟预报，选取韩国某一核电站(129.415 51° E，36.992 82° N)作为突发核事故的虚拟情景，采用模拟预测系统(WRF-HYSPLIT)对核泄漏物质的大气扩散进行模拟预报。假设事故并没有出现爆炸且放射性粒子没有向高空喷射，因此设定放射性粒子在地面层释放，目前在模式中核电站对应的格点上的泄漏源设定为单位浓度，并且为持续排放。试验模拟时间为2019年9月1日00时~9月8日00时(共7 d)，假设在这个时段发生核泄漏，并认为核泄漏物质随风场扩散。驱动WRF模式的背景场资料是NECP发布的全球大气再分析资料FNL(Final Operational Global Analysis data)，每天4个时次(世界时00时、06时、12时、18时)，时间间隔为6 h，分辨率为1°×1°。区域模拟选取多重嵌套，模拟范围如图14所示区域空间分辨率最高达到5 km，预报时效为72 h，预报数据的时间分辨率为1 h。WRF模式在9月1日00时、9月4日00时和9月7日00时分别做三次预报。

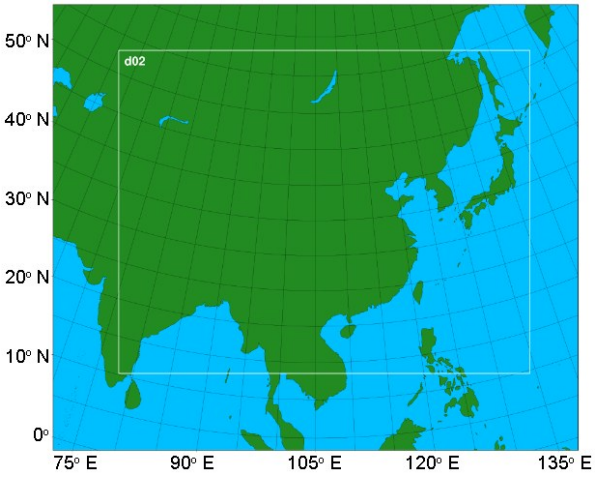
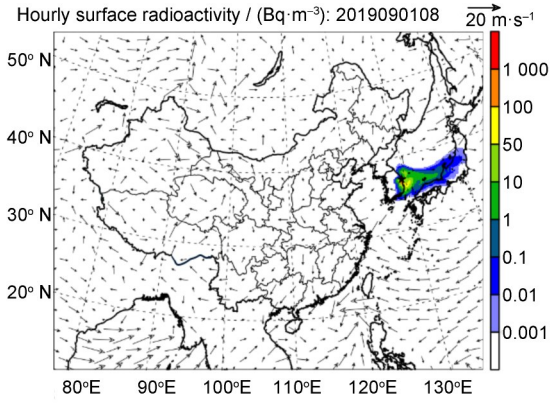


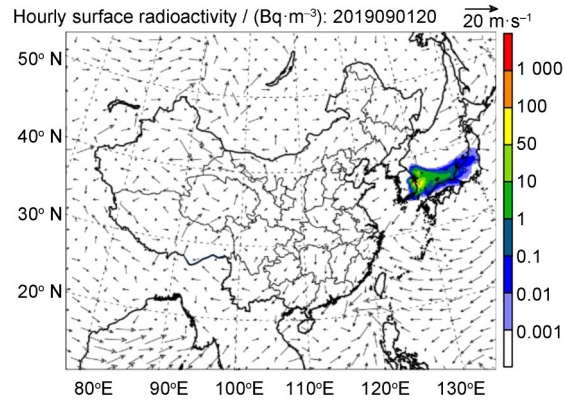
图 14 模拟区域范围设置

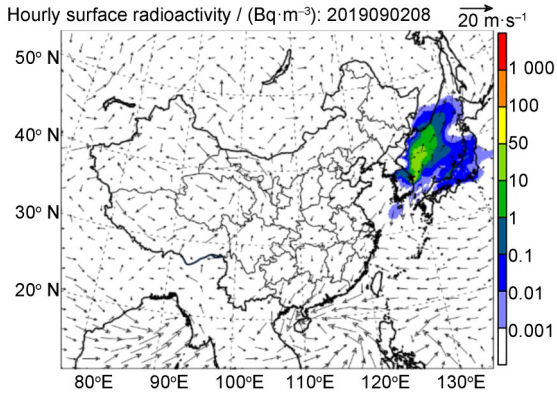
Fig.14 The scope setting for the simulation area

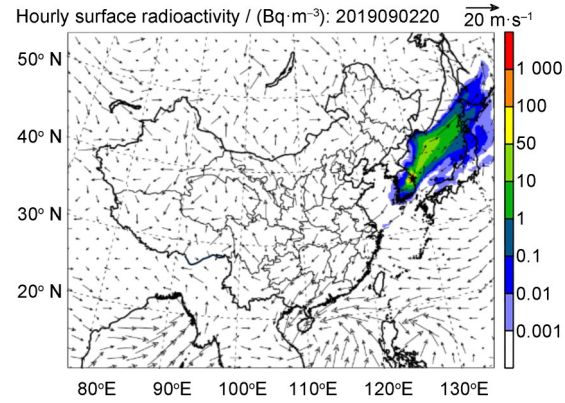
2.2.2 试验结果

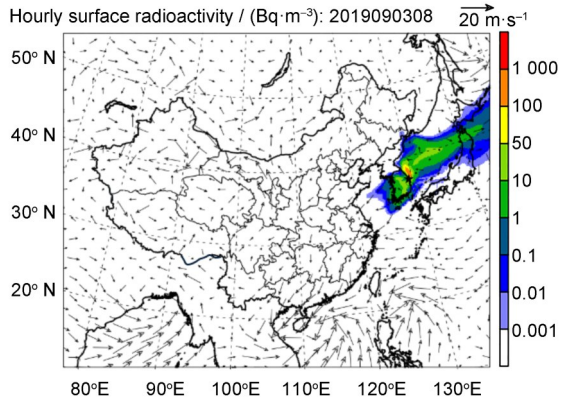
从图15核电站核泄漏物质浓度分布图可知，9月1日，韩国地区受西南风影响，核污染物往东北方向扩散，由于近地面风速较小，核污染物扩散的趋势较弱，暂时对我国的影响较小。2日，该地区的偏南风加大，核污染物进一步向北扩散，影响到了日本地区。3日，风向转变，受偏东风影响，核污染物开始往西扩散，从08时到20时，12 h内核污染物扩散到了山东地区（从核泄漏开始的68 h内影响范围到达了山东），4~5日，在偏东风的持续影响下，核污染物继续向西扩散影响到我国的大部分地区（黑龙江、吉林、辽宁、京津冀、山东、江苏、江西、安徽、河南、湖北），其中东北地区受其影响较重。7日核污染物的影响范围在中国向北向南进一步扩大，影响范围最北可到中国的最北端，最南可达到广西。通过分析可知，HYSPLIT模式模拟的核污染物扩散结果与模拟的风场结果比较吻合，扩散趋势也与符合风场的形势，呈现出较高的一致性。这也进一步说明了利用大气扩散模式HYSPLIT和区域高分辨率模式WRF，进行区域核污染物扩散预报的有效性。

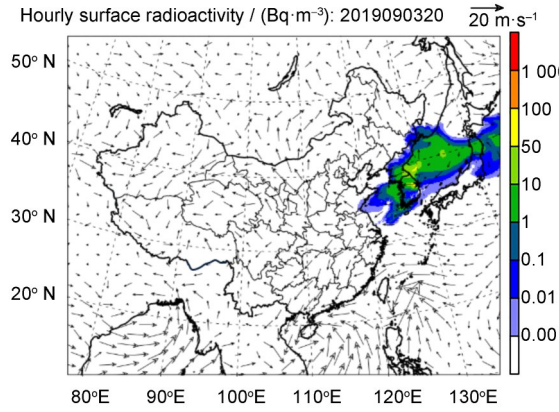

Hourly surface radioactivity / (Bq·m⁻³): 2019090108
20 m·s⁻¹
50° N
40° N
30° N
20° N
80°E
90°E
100°E
110°E
120°E
130°E
1 000
100
50
10
1
0.1
0.01
0.001

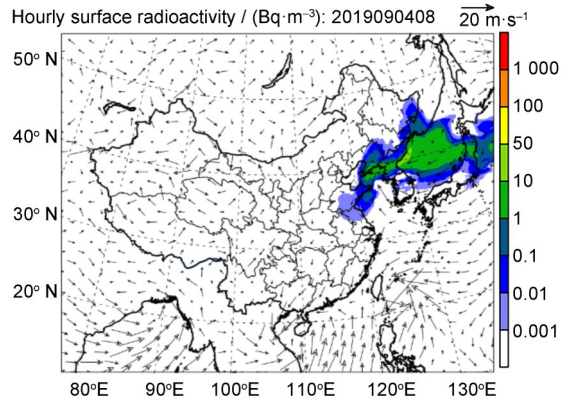

Hourly surface radioactivity / (Bq·m⁻³): 2019090120
20 m·s⁻¹
50° N
40° N
30° N
20° N
80°E
90°E
100°E
110°E
120°E
130°E
1 000
100
50
10
1
0.1
0.01
0.001

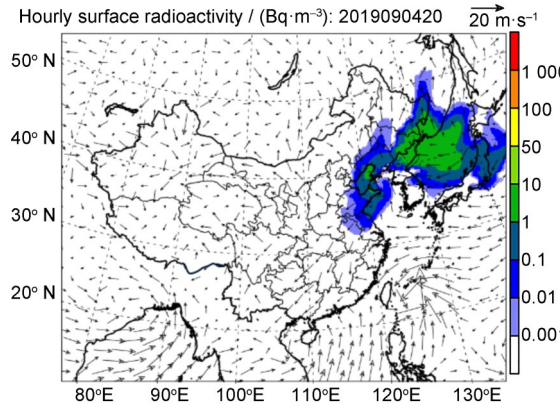

Hourly surface radioactivity / (Bq·m⁻³): 2019090208
20 m·s⁻¹
50° N
40° N
30° N
20° N
80°E
90°E
100°E
110°E
120°E
130°E
1 000
100
50
10
1
0.1
0.01
0.001


Hourly surface radioactivity / (Bq·m⁻³): 2019090220
20 m·s⁻¹
50° N
40° N
30° N
20° N
80°E
90°E
100°E
110°E
120°E
130°E
1 000
100
50
10
1
0.1
0.01
0.001


Hourly surface radioactivity / (Bq·m⁻³): 2019090308
20 m·s⁻¹
50° N
40° N
30° N
20° N
80°E
90°E
100°E
110°E
120°E
130°E
1 000
100
50
10
1
0.1
0.01
0.001


Hourly surface radioactivity / (Bq·m⁻³): 2019090320
20 m·s⁻¹
50° N
40° N
30° N
20° N
80°E
90°E
100°E
110°E
120°E
130°E
1 000
100
50
10
1
0.1
0.01
0.001


Hourly surface radioactivity / (Bq·m⁻³): 2019090408
20 m·s⁻¹
50° N
40° N
30° N
20° N
80°E
90°E
100°E
110°E
120°E
130°E
1 000
100
50
10
1
0.1
0.01
0.001


Hourly surface radioactivity / (Bq·m⁻³): 2019090420
20 m·s⁻¹
50° N
40° N
30° N
20° N
80°E
90°E
100°E
110°E
120°E
130°E
1 000
100
50
10
1
0.1
0.01
0.001

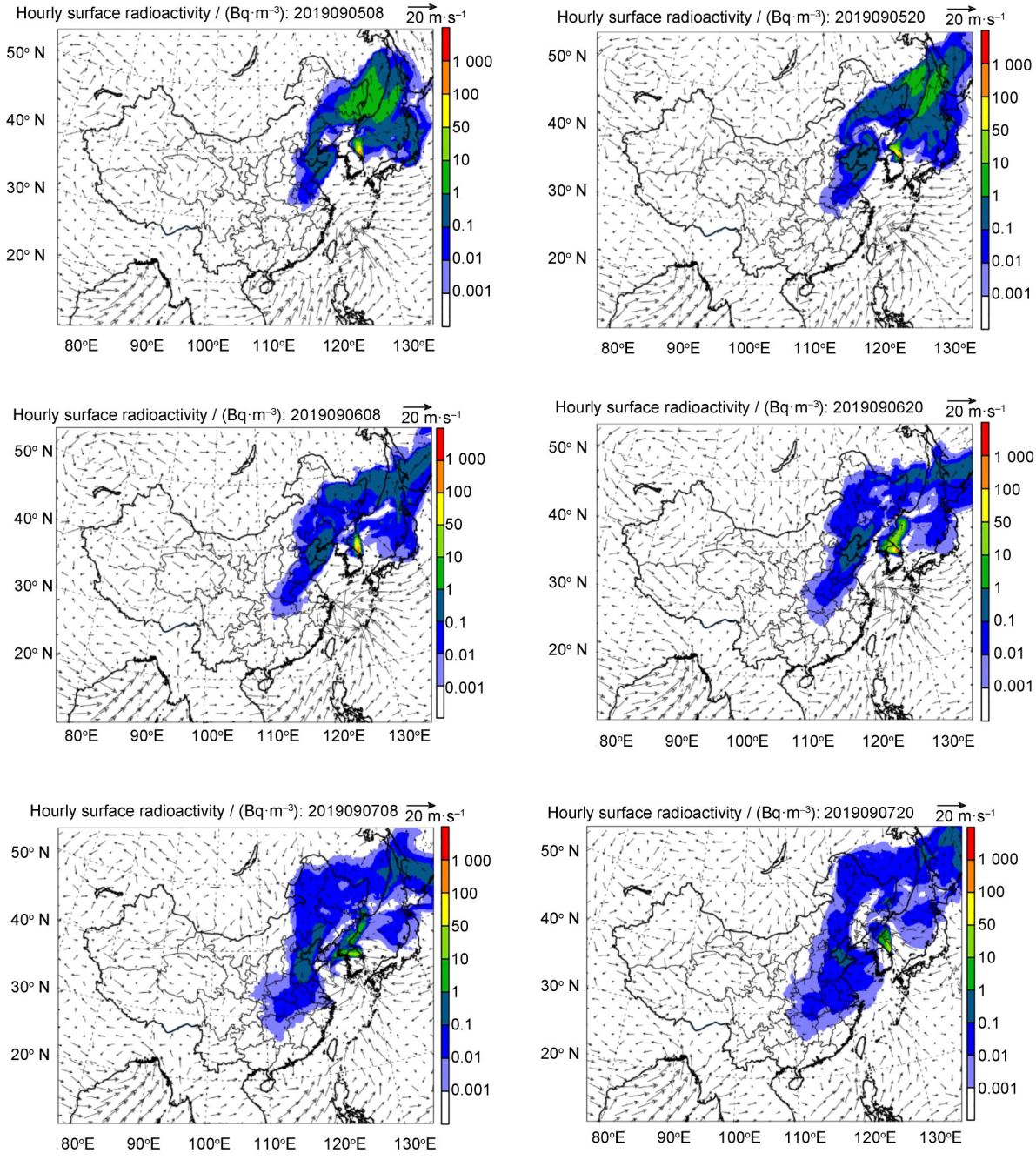


图 15 核电站核泄漏物质(8时/20时)浓度分布

Fig.15 Distribution of the concentration of nuclear leakage substances (8:00 UTC/20:00 UTC) in nuclear power plants

3 结论

本研究利用HYSPLIT模式开展了核污染物数值预报试验，通过对欧洲示踪试验和虚拟事故情景下的模拟预报试验进行分析，得出如下结论：(1)HYSPLIT模式可以有效预报核污染物的扩散轨迹，模拟轨迹误差主要受到风向、风速的影响，且初始状态误差会使轨迹模拟的误差随着预报时效增加而逐渐增大，因此，进行轨迹模拟时，可以通过区域模式提高气象场的分辨率或通过资料同化方法提高气象场的准确度，从而减小轨迹模拟的误差；(2)对于单次轨迹模拟，模型模拟轨迹会存在偏差，但在一定时间范围内，轨迹模拟可以很好反映示踪剂在释放后空间范围内整体的分布特征；(3)对于释放过程较长的过程，模式可以反映其主要的扩散方向，对于短期内的释放，需

要对时间、空间分辨率的气象数据进行驱动模拟，使模拟结果与实际轨迹更为吻合；(4)利用大气扩散模式HYSPLIT和区域高分辨率模式WRF可以实现区域核污染物的数值预报，模式可以预报出事故区域核泄漏物质的扩散路径和浓度分布。

作者贡献声明 王广杰负责核污染物扩散模拟试验和论文撰写；沈红、李娟负责模拟结果的分析和绘图；兰伟仁负责气象模式WRF的模拟；管维彪负责论文的撰写和论文发表相关工作。所有作者均已阅读并同意最终文本。

参考文献

1 费建芳, 王鹏飞, 程小平, 等. 日本大地震福岛核污染物扩散传输区域模拟研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, **44**(2): 271-282. DOI: 10.1007/s11430-013-4811-2.
FEI Jianfang, WANG Pengfei, CHENG Xiaoping, *et al*. Regional simulation study on diffusion and transmission of nuclear pollutants in Fukushima, Japan earthquake[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2014, **44**(2): 271-282. DOI: 10.1007/s11430-013-4811-2.

2 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.
NIE Xinwang, WANG Yibai, SUN Shouxun, *et al*. Application of models-3/CMAQ to radioactive leak at fukushima in March 2011[J]. Meteorological Monthly, 2012, **38**(10): 1182-1188.

3 崔慧玲, 姚仁太, 徐向军. 放射性核素长距离迁移模拟研究进展[J]. 辐射防护, 2012, **32**(4): 240-247.
CUI Huiling, YAO Rentai, XU Xiangjun. Advancement of studies on long-range dispersion modeling for radionuclides[J]. Radiation Protection, 2012, **32**(4): 240-247.

4 沈越, 胡筱敏, 马云峰, 等. 核电站大气核污染扩散预警技术[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2017, **38**(10): 1482-1485, 1490. DOI: 10.12068/j.issn.1005-3026.2017.10.023.
SHEN Yue, HU Xiaomin, MA Yunfeng, *et al*. Warning technology for air nuclear pollution diffusion of nuclear power plant[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2017, **38**(10): 1482-1485, 1490. DOI: 10.12068/j.issn.1005-3026.2017.10.023.

5 费建芳, 王锐, 王益柏, 等. 一次大雾天气下$PM_{2.5}$二次无机粒子的数值模拟[J]. 大气科学学报, 2009, **32**(3): 360-366. DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.2009.03.005.
FEI Jianfang, WANG Rui, WANG Yibai, *et al*. A numerical analysis of secondary aerosol inorganic particles of $PM_{2.5}$ in a strong fog[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2009, **32**(3): 360-366. DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.2009.03.005.

6 Draxler R R, Hess G D. Description of the HYSPLIT_4 modeling system[EB/OL]. (2014-07-04) [2023-09-06]. https://www.arl.noaa.gov/documents/reports/arl-224.pdf.

7 Draxler R R, Hess G D. An overview of the HYSPLIT_4 modelling system fof trajectories, dispersion, and deposition[J]. Aust Meteor Mag, 1998, **47**: 295-308.

8 章志英. 核污染长距离输送的数值模拟[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
ZHANG Zhiying. Numerical simulation of long-distance transportation of nuclear pollution[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.

9 van Dop H, Addis R. ETEX: A European tracer experiment observations, dispersion modeling and emergency response[J]. Atmospheric Environment, 1998, **32**(24): 4089-4094.

10 Graziani G, Mosca S, Klug W. Real-time long-range dispersion model evaluation of ETEX first release[M]. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Commission, 1998.

11 Graziani G, Klug W, Galmarini G, *et al*. Realtime long-range dispersion model evaluation of ETEX second release[M]. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Commission, 1998.