暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

三种云微物理参数化方案对台风期间放射性物质扩散模拟的影响

张耀云 龚军军 胡知临 陈君军

The impact of cloud microphysical parameterization schemes on the diffusion of radioactive material during typhoon conditions

ZHANG Yaoyun，GONG Junjun，HU Zhilin，CHEN Junjun

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2023-205

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

GRAPES_Meso模式中两种双参数云微物理方案对冷云过程模拟的比较研究
Comparison of two double-moment cloud microphysics schemes in the GRAPES_Meso model on simulating a cold cloud process
暴雨灾害. 2022, 41(3): 336-347 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.03.010

湖北一次梅雨期暴雨过程的数值模拟及云微物理特征分析
Numerical simulation and analysis on cloud microphysical characteristics during a Meiyu heavy rainfall event in Hubei province
暴雨灾害. 2023, 42(4): 372-383 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-062

毫米波云雷达观测和反演云降水微物理及动力参数方法研究进展
Reviews on retrieval methods for microphysical and dynamic parameters with cloud radar
暴雨灾害. 2021, 40(3): 231-242 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.03.002

地基多波长雷达垂直探测云降水微物理特征研究进展
Research progress in profiling cloud and precipitation microphysics characteristic with ground-based multi-frequency radars
暴雨灾害. 2023, 42(4): 361-371 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-075

大气冰核浓度对华北一次大范围强降水影响的模拟分析
A numerical study of the effects of varing ice nuclei concentration on severe precipitation of a large area in north China
暴雨灾害. 2022, 41(4): 413-425 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.04.006

层积云与积云中的微物理特征及其影响因子
Stratocumulus and cumulus microphysics and the influencing factors
暴雨灾害. 2021, 40(3): 297-305 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.03.008

关注微信公众号，获得更多资讯信息

张耀云,龚军军,胡知临,等.2025.三种云微物理参数化方案对台风期间放射性物质扩散模拟的影响[J].暴雨灾害,44(6):847−857.
ZHANG Yaoyun, GONG Junjun, HU Zhilin, et al. 2025. The impact of cloud microphysical parameterization schemes on the diffusion of radioactive material during typhoon conditions [J]. Torrential Rain and Disasters,44(6):847−857 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−205

三种云微物理参数化方案对台风期间放射性物质扩散模拟的影响

张耀云, 龚军军, 胡知临, 陈君军
(海军工程大学, 武汉 433033)

摘　要: 快速准确地预测核电站事故发生后放射性物质在大气中的扩散规律, 可为相关部门及时作出辐射防护科学决策提供重要的参考依据。以中国浙江省某核电站假想事故情况为例, 采用 WRF 和 FLEXPART-WRF 模式进行虚拟模拟, 探究 WSM3、Thompson、CAM5.1 三种云微物理参数化方案 (以下简称三种方案) 对台风期间放射性物质 Cs-137 扩散模拟的影响, 并分析 Cs-137 浓度的输运和扩散特征。结果表明: 三种方案模拟的风场和降雨与观测基本吻合, 其中 CAM5.1 方案总体模拟效果最好。Cs-137 浓度输运和扩散特征受气象场模拟结果的影响较大, 不同云微物理参数化方案模拟结果存在明显差异。其中 CAM5.1 方案近地面浓度扩散范围最大, 与降雨覆盖面最广相匹配; 三种方案干沉降变化范围基本一致; Cs-137 主要受湿沉降影响, 三种方案最大湿沉降在模拟开始后的 12 h 内快速增加, 随后趋于稳定, 沉降峰值以 Thompson 方案最大, WSM3 方案次之, CAM5.1 方案最小。

关键词: 云微物理参数化; 放射性物质扩散; 数值模拟; 干沉降; 湿沉降
中图法分类号: P435　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2023−205

The impact of cloud microphysical parameterization schemes on the diffusion of radioactive material during typhoon conditions

ZHANG Yaoyun, GONG Junjun, HU Zhilin, CHEN Junjun

(*Naval University of Engineering*, *Wuhan* 430033)

Abstract: Quickly and accurately predicting the diffusion pattern of radioactive substances in the atmosphere after a nuclear power plant accident can provide important reference for relevant departments to make timely scientific decisions on radiation protection. The research takes the hypothetical accident situation of a nuclear power plant in Zhejiang Province, China as an example, and uses WRF and FLEXPART-WRF models for virtual simulation to explore the effects of three cloud microphysical parameterization schemes (WSM3, Thompson, CAM5.1) on the diffusion simulation of radioactive substance Cs-137 during typhoons, and analyze the transport and diffusion characteristics of Cs-137 concentration.. The results are as follows. The simulated wind patterns and precipitation from all three schemes are generally consistent with the empirical observations, with the CAM5.1 scheme achieving the highest overall simulation accuracy. The transport and diffusion profiles of Cs-137 concentrations are heavily influenced by the simulated meteorological conditions, exhibiting significant variations among the different microphysics schemes. The CAM5.1 scheme, in particular, displays the broadest dispersion of near-surface concentrations, corresponding to the widest spread of rainfall. The variations in dry deposition are relatively uniform across all three schemes. Cs-137 concentrations are primarily driven by wet deposition, which peaks sharply within the initial 12 hours of the simulation and then levels off. The settlement peak is highest in the Thompson scheme, followed by the WSM3 scheme, and lowest in the CAM5.1 scheme.

Key words: cloud microphysical parameters; radioactive material diffusion; numerical simulation; dry deposition; wet deposition

引　言

放射性物质在大气中的输运和扩散受风、温度、降雨、大气稳定度和湍流混合等诸多因素影响 (Madala et al., 2015)。以物理模型为基础的数值模拟研究在监测和评估放射性物质浓度方面具有重要优势 (Rakesh et al., 2015; Peter et al., 2022, Zamora et al.,

收稿日期: 2023−09−26; **定稿日期**: 2024−03−10
第一作者: 张耀云, 主要从事数值预报及核事故辐射防护研究。E-mail: 872059589@qq.com
通信作者: 陈君军, 主要从事数值天气预报及核事故应急系统研究。E-mail: m21382701@nue.edu.cn
© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

2022), 并广泛应用于不同天气下的污染物分析和污染物追踪等领域 (Guo et al., 2018; Preez et al., 2020; Hui et al., 2022)。Arnold 等 (2014) 研究表明, 核事故发生时气象场中降雨作用对放射性物质扩散具有重要影响, 降雨是准确预估云下湿沉降的关键物理量, 可直接影响放射性物质的沉积落区和浓度分布。同时, 研究发现近地层风场可改变污染物扩散的浓度和轨迹, 较好的风速和风向时空预报对追踪粒子的运动轨迹和空间浓度分布有重要影响 (王颖等, 2015; 何欢等, 2020; Idrees et al., 2021; 白莹莹等, 2024)。

WRF (Weather Research and Forecasting Model) 是一种广泛应用于气象学领域的中尺度数值预报模式。该模式包括多种云微物理参数化方案, 比如 WSM3 方案、Thompson 方案、CAM5.1 方案等, 用于模拟不同的物理过程, 而这些方案则对模拟或预报产生不同的影响。WSM3 方案是一种基于粒径分布的单参数微物理方案, 其包括水蒸气, 云水/冰和雨水/雪三类水物质, 被称为简单冰方案 (Hong et al., 2004)。同时该方案也考虑了气溶胶和云微物理的相互作用, 因此能够更好地模拟气溶胶的输送和分布。Thompson 方案是一种不完全双参数微物理方案, 预报雨水和云冰数浓度的同时, 还考虑了云滴和冰晶的生长过程, 包括冰晶的碰撞、沉积和凝结等过程 (Thompson et al., 2004, 2008), 适用于模拟降雨及复杂气象场景。CAM5.1 方案是一种基于弹性分子气象和云微物理过程的双参数微物理方案, 可以考虑水和冰的多种形态, 该方案引入了快速微物理过程, 如降雨产生和微观湍流等, 适用于复杂的大气物理场景的研究 (Colle et al., 2005)。实际研究中, 不同的云微物理参数化方案会影响大气模式的低空物理过程, 从而影响污染物的扩散模拟效果, 包括污染物的分布和扩散特征 (Srinivas et al., 2016; 郭欢等, 2023)。

拉格朗日粒子扩散模式 (FLEXible PARTicle dispersion model, FLEXPART) 由挪威大气研究所开发, 主要用于研究大气污染物的源-受体关系 (污染排放为源, 观测站点为受体)。该模式通过时间的前向运算来模拟点、线、面或体积源释放的污染粒子在大、中尺度区域的传输、扩散和沉降等过程。FLEXPART 模式可用于实时估算稳定条件下短程范围内的放射性物质浓度, 为核应急系统提供决策支持 (Rakeshetal.,2021)。Long 等(2018) 采用FLEXPART 模式模拟福岛核电站释放的放射性核素, 并利用热带西太平洋和东南亚中 10 个监测点对放射性物质 I-131 和 Cs-137的活性浓度进行了验证, 结果显示 FLEXPART 模式与观测结果吻合较好, 可用于评估辐射影响。同时, 研究还证明通过耦合 FLEXPART 和 WRF (以下简称 FLEXPART-WRF) 大气扩散模式, 可用于分析长期稳定气象条件下大气污染物的传输路径和扩散特征 (余钟奇等, 2019; 顾尧等, 2020)。然而, 在核事故实际发生后, 放射性物质的扩散模拟不能仅限于稳定条件, 在极端天气条件下, 扩散模拟可能会有所变化。因此, 选择适合的云微物理参数化方案来准确模拟极端天气, 对研究放射性物质扩散特征具有重要意义。

2022 年第 12 号台风“梅花”在穿越我国沿海内陆时受到副热带高压的影响, 导致北部沿海地区出现了超强降雨, 累计降雨量超过 250 mm, 并对我国华东、东北地区带来了显著的强风雨影响。本文利用 WRF 中尺度数值预报模式和 FLEXPART-WRF 大气扩散模式, 分别采用 WSM3、Thompson、CAM5.1 三种不同的云微物理参数化方案 (以下简称三种方案) 进行数值模拟, 并将其结果用于驱动 FLEXPART-WRF, 并基于中国浙江省某核电站在 2022 年台风“梅花”期间发生的假想事故, 通过设置假想排放点和排放方式等变量, 模拟放射性物质 Cs-137 的扩散情况, 并对比分析三种云微物理参数化方案对 Cs-137 近地面浓度分布和干 (湿) 沉降模拟结果之间的差异。

1 模拟方案设计及资料与方法

1.1 FLEXPART-WRF 简介

利用 WRF 三维气象场数据驱动 FLEXPART-WRF 模式, 不仅考虑了垂直速度上的偏斜, 而且考虑了空气密度的垂直梯度 (Brioude et al., 2013), 通过释放大量随机粒子, 并跟踪粒子在湍流中的运动, 获取粒子位置以增强对污染物的模拟精度。

FLEXPART-WRF 模式采用“零加速度”方案, 表达式为

$$\boldsymbol{X}(t+\Delta t)=\boldsymbol{X}(t)+\boldsymbol{v}(X,t)\Delta t \tag{1}$$

此方案精确到一阶, 对轨迹方程进行积分

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{X}}{\mathrm{d}t}=\boldsymbol{v}[X(t)] \tag{2}$$

式中, t 表示时间, Δt表示时间增量, $\boldsymbol{X}$ 为污染物位置向量, $\boldsymbol{v}=\bar{\boldsymbol{v}}+\boldsymbol{v}_t+\boldsymbol{v}_{\mathrm{m}}$表示由网格尺度分量$\bar{\boldsymbol{v}}$、湍流脉动分量$\boldsymbol{v}_t$和中尺度风脉动分量$\boldsymbol{v}_{\mathrm{m}}$共同组成的风矢量。

粒子干沉降速率由粒子属性及所在网格的土地覆盖类型等决定。湿沉降分云内湿沉降和云下湿沉降两种, 云内清除主要是由活化的粒子形成云滴或冰核, 结合在一起从云中沉降至地面, 从而去除云中包含的污染物粒子。云下湿沉降系数$\boldsymbol{\Lambda}$表达式为

$$\boldsymbol{\Lambda}=AI^{B} \tag{3}$$

式中, I 为降雨强度 (单位: mm·h^{-1}), A 为气溶胶粒子在 I=1 mm·h^{-1} 时的沉降系数, A=10^{-4}, B 为用于描述降雨强度对湿沉降系数影响的非线性程度的参数, B=0.8。

1.2 模式参数设置

WRF 模式和 FLEXPART-WRF 模式基本参数设置见表 1。

1.3 资料及统计指标说明

本文选用 WRF-ARW 4.4.1 版本, 并采用单向两层嵌套 (图 1) 进行模拟。初始背景场采用 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 提供的 1°×1°空间分辨率、每 6 h 更新 1 次的 FNL (Final Operational Global Analysis) 全球再分析资料。风场对比观测数据来源于羲和能源数据平台 (https://www.xihe-energy.com) 提供的欧洲中期全球反演数据, 时间分辨率为 1 h, 经与美国国家海洋大气局及场站的实测数据对比, 其风速和风向的平均误差分别为 0.93% 和 2.65%, 数据精度较高, 可作为观测数据对比分析。共选取靠近台风轨迹的 8 个地面观测站点 (位置见图 1) 对 WRF 模式模拟的风速、风向效果进行评估。降雨实况观测数据来源于美国宇航局

表 1 WRF 模式和 FLEXPART-WRF 模式基本参数设置

Table 1 Basic parameter settings of the WRF and FLEXPART-WRF models

模式名称	参数或方案	参数设置
WRF	模拟中心点	120°95′E, 30°44′N
	模拟时间段	2022年9月14日12时—2022年9月17日12时
	嵌套网格分辨率	27 km; 9 km
	网格点数	193×208
	垂直分层	48; 48
	驱动数据	FNL逐6 h再分析数据
	云微物理方案	WSM3; Thompson; CAM5.1
FLEXPART-WRF	模拟类型	前向模拟
	释放类型	点源持续释放(72 h)
	释放总量	3.18 E+02 PBq
	释放速率	12.27 TBq·s^{-1}(均匀释放)
	释放粒子数目	318 000
	粒子尺寸	平均直径0.4 μm; 偏差0.3 μm
	释放高度	地面释放
	网格点数	193×208

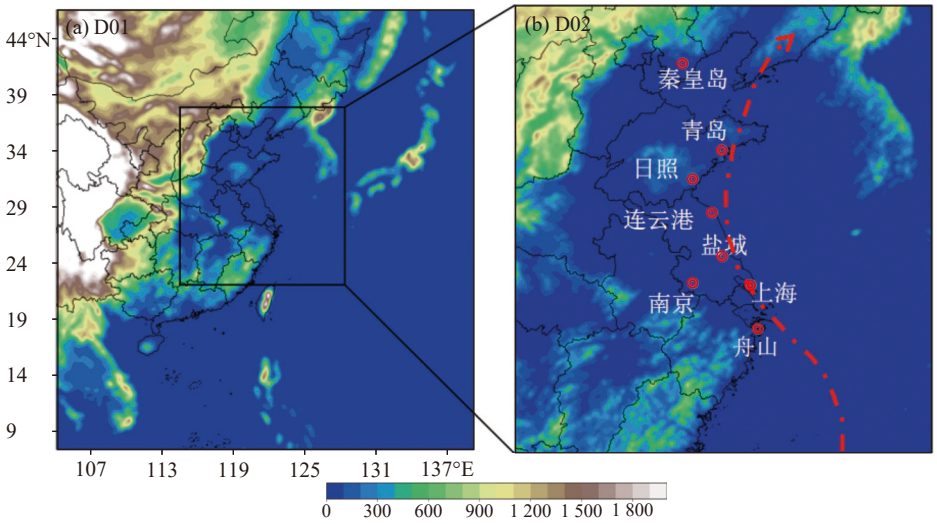


图 1 WRF 模式嵌套区域 D01 (a) 和 D02 (b) 及其地形高程 (填色, 单位: m) 和观测站点 (红色圆点) 空间分布 (红色点划线表示台风“梅花”路径)

Fig. 1 The (a) D01 and (b) D02 nesting area of the WRF model and spatial distribution of topographic elevation (shaded, unit: m) and observation stations (red dots) (The red dotted line marks the path of Typhoon Muifa)

官网 (https://gpm1.gesdisc.eosdis.nasa.gov/) 提供的卫星降雨数据集 (Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM:late-run, IMERG-L), 空间分辨率为 0.1°×0.1°, 此降雨产品经与地面站点观测数据比较, 精度较高且误差偏低, 一定程度可以替代地面观测站点雨量数据 (韩芙蓉等, 2023; Beck et al., 2022)。

为验证 WRF 模拟区域的降雨效果, 计算前采用面平均法对模拟数据进行预处理, 将空间分辨率统一为 0.1°×0.1°。所用统计指标包括相关系数 (CC)、平均绝对误差 (MAE)、均方根误差 (RMSE)。CC(记为 C_C) 反映了模拟结果与观测数据之间变化趋势的相似程度; MAE (记为 E_{MA}) 反映由数值模式引起的系统误差, RMSE (记为 E_{RMS}) 表征模拟误差, 计算公式如下

$$C_C = \sum_{i=1}^{N}(F_i-\overline{F})(O_i-\overline{O}) \Big/ \sqrt{\sum_{i=1}^{N}(F_i-\overline{F})^2 \sum_{i=1}^{N}(O_i-\overline{O})^2} \quad (4)$$

$$E_{MA} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|F_i-O_i| \quad (5)$$

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(F_i-O_i)^2} \quad (6)$$

式中, N 是参与计算的网格总数, F_i、$\bar{F}$是第 i 个网格的模拟值及其模拟平均值, O_i、$\bar{O}$是第 i 个网格的观测值及其观测平均值。

2 结果分析

2.1 WRF 模拟结果

2.1.1 风场模拟结果

选择靠近台风轨迹的 8 个地面观测站点, 对台风过境期间近地面 10 m 风速和风向进行验证。图 2 展示了 WSM3、Thompson、CAM5.1 三种方案在 8 个站点模拟的风速和风向概率密度曲线。从图 2a 可见, 三种方案模拟的风速变化规律与观测基本一致, 说明三种方案均能够较好地反映台风过境期间的风速变化情况。在图 2b 中, 横坐标表示正北方向与风向的夹角。由于 0°和 360°等价, 因此图中的左右两端具有相同的实际意义。分析图 2b 可知, 在模拟时段内, 三种方案均显示出风向存在小幅度偏差, 但总体上反映了台风期间的风向变化, 与观测值接近。

表 2 为三种方案模拟的逐小时气象参数与观测值的 CC、MAE 和 RMSE, 气象参数包括 10 m 风速、2 m 温度和相对湿度。可见三种方案中, 风速 CC 相当, 均在 0.6 以上, MAE 和 RMSE 均在 2 m·s^{-1} 内, 表明三种方案模拟的风速与观测存在显著相关性。三种方案对温度的模拟效果优于风速, 总体误差保持在 2 ℃ 左右。此外, CAM5.1 方案对相对湿度的模拟效果最佳, CC 达 0.88, MAE 和 RMSE 分别为 4.98 和 6.73。综上所述, 三种方案均能较好地模拟出风

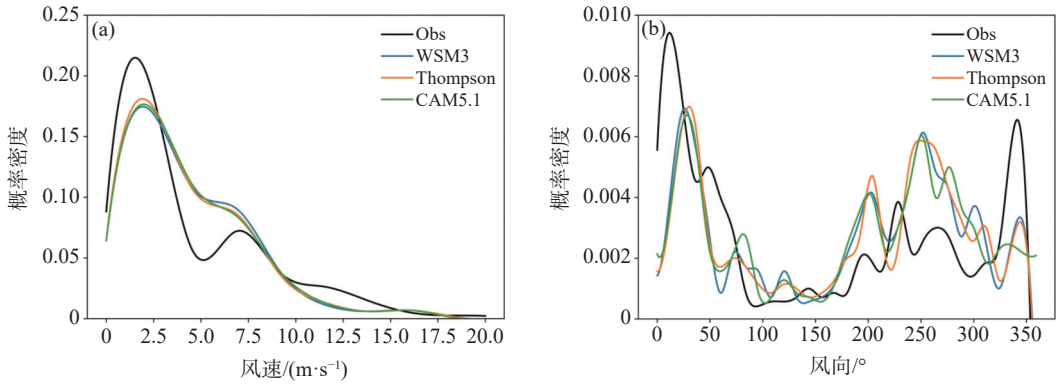


图 2 WSM3、Thompson、CAM5.1 方案模拟和观测 (Obs) 的 8 个站点的风速 (a) 和风向 (b) 概率密度

Fig. 2 Probability density maps of (a) wind speed and (b) wind direction from WSM3, Thompson, CAM5.1 schemes simulations and observations (Obs) at eight stations

表 2 WSM3、Thompson、CAM5.1 方案模拟的逐小时气象参数与观测值的相关系数 (CC)、平均绝对误差 (MAE) 和均方根误差 (RMSE)

Table 2 Correlation coefficient (CC), mean absolute error (EMA), and root mean square error (ERMS) of hourly meteorological parameters between simulations of WSM3, Thompson, CAM5.1 schemes and observations

云微物理参数化方案	风速			温度			相对湿度		
	CC	MAE/(m·s^{-1})	RMSE/(m·s^{-1})	CC	MAE/℃	RMSE/℃	CC	MAE/%	MRSE/%
WSM3	0.65	1.19	1.87	0.81	1.81	2.57	0.85	5.28	7.44
Thompson	0.63	1.12	1.96	0.77	2.01	2.98	0.86	7.01	8.75
CAM5.1	0.67	1.29	1.97	0.83	1.72	2.11	0.88	4.98	6.73

速、温度和相对湿度的变化特征, 基本能反映实况。

2.1.2 降雨模拟结果

为充分了解强降雨所造成的湿沉降特征, 将三种方案模拟的不同时刻累积降雨空间分布与观测 (图 3) 进行对比。由于受热带气旋影响, 此次台风带来了充足的水汽, 使得降雨充沛, 特别是随着时间的推移, 台风风眼路径经过的部分区域出现了大暴雨 (图 3a、e、i、m)。从前 12 h 累积降雨空间分布 (图 3a—d) 来看, IMERG-L 降雨观测资料显示降雨主要发生在沿海地区, 海上也有一条短直的降雨带; 三种方案模拟的降雨范围和强度相差不大, 基本模拟出实况。IMERG-L 观测的 24 h 累积降雨明显增大, 范围不变; 三种方案模拟的降雨在沿海地区相近, WSM3 方案和 Thompson 方案模拟的海上降雨带偏窄, 而 CAM5.1 方案的模拟结果与观测更接近 (图 3e—h)。IMERG-L 观测的 48 h 累积降雨在沿海地区北部较多, 而南部雨止; 虽然 CAM5.1 方案较其他两者模拟的降雨强度整体偏小, 但降雨覆盖面最大, 最接近观测 (图 3i—l)。三种方案模拟的 72 h 累积降雨与 48 h 累积降雨相近, 这说明后 24 h 降雨停止 (图 3m—p)。总体而言, 三种方案均有过报现象, CAM5.1 方案比 WSM3 方案和 Thompson 方案模拟的降雨落区更集中, 过报现象缓

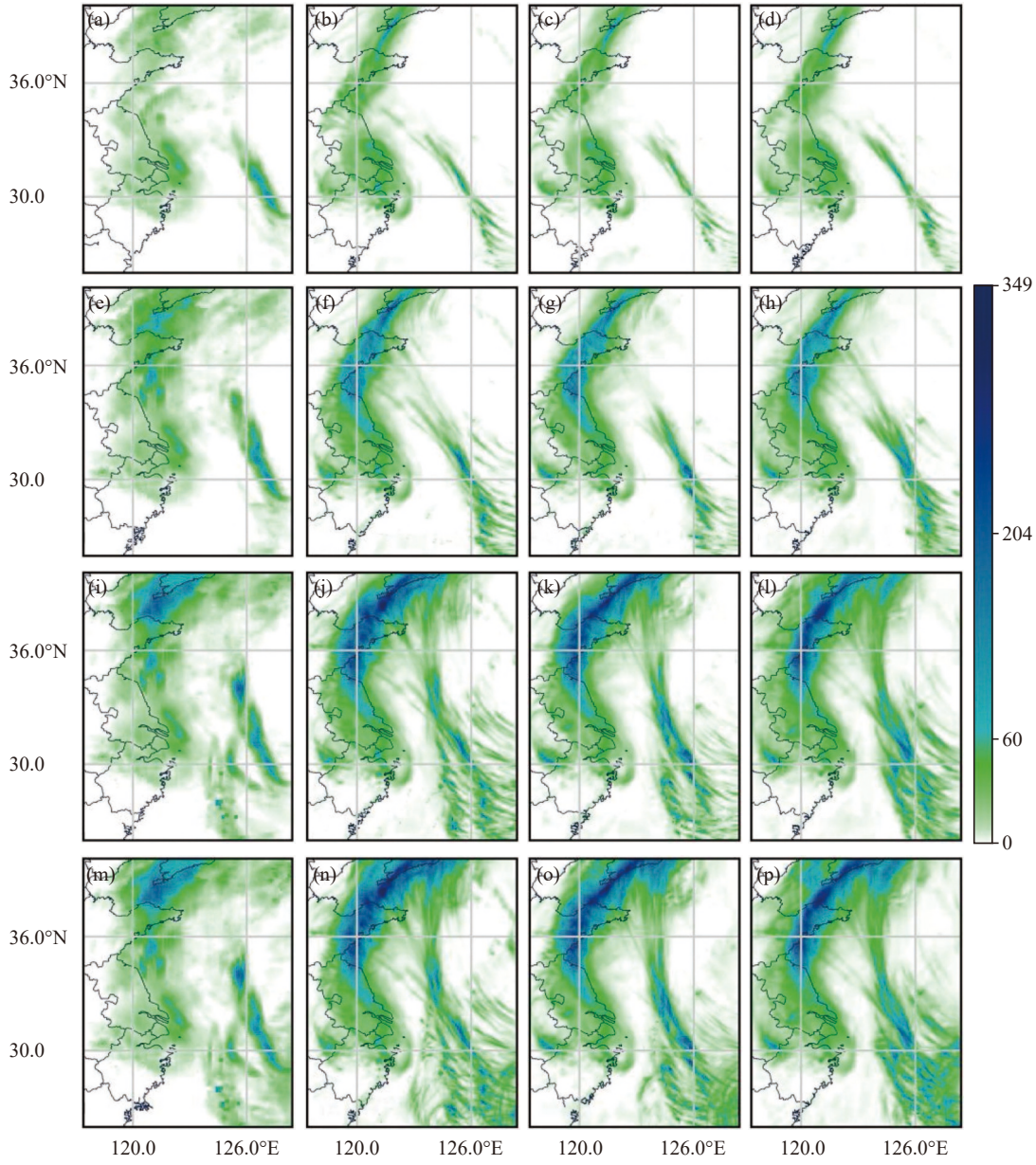


图 3 2022 年 9 月 14 日 12 时—17 日 12 时 IMERG-L 观测的 (a, e, l, m) 以及 WSM3 方案 (b, f, j, n)、Thompson 方案 (c, g, k, o)、CAM5.1 方案 (d, h, l, p) 模拟的 12 h (a, b, c, d)、24 h (e, f, g, h)、48 h (i, j, k, l)、72 h (m, n, o, p) 累积降雨的空间分布 (单位: mm)

Fig. 3 Spatial distribution of accumulated rainfall (unit: mm) observed by (a, e, l, m) IMERG-L and simulated by (b, f, j, n) WSM3 scheme, (c, g, k, o) Thompson scheme, and (d, h, l, p) CAM5.1 scheme for (a, b, c, d) 12 hours, (e, f, g, h) 24 hours, (i, j, k, l) 48 hours, and (m, n, o, p) 72 hours from 12:00 BT on September 14 to 12:00 BT on September 17, 2022

于其他两种方案。利用多个指标评估三种方案模拟的降雨效果 (表 3) 可知，三种方案的 CC 随着模拟时间的增加而增加，三种方案之间的 CC 接近，表明它们与观测的相关程度相当。CAM5.1 方案在前 12 h、24 h、48 h 累积降雨的 MAE 均最低，这也体现出 CAM5.1 方案的优越性，这也与前文分析的 48 h 时 CAM5.1 方案模拟结果与观测最接近的结论一致。CAM5.1 方案在前 24 h 累积降雨的 RMSE 均最低，与降雨实况更接近。可见，CAM5.1 方案的降雨模拟结果优于 WSM3 方案和 Thompson 方案。

表 3 WSM3、Thompson、CAM5.1 方案模拟的不同时长降雨与观测值的相关系数 (CC)、平均绝对误差 (MAE) 和均方根误差 (RMSE)

Table 3 Correlation coefficient (CC), mean absolute error (MAE), and root mean square error (RMSE) of precipitation of different durations between simulations of WSM3, Thompson, CAM5.1 schemes and observations

云微物理参数化方案	模拟时长/h	CC	MAE /mm	RMSE /mm
WSM3	12	0.41	4.36	11.21
	24	0.45	8.43	19.78
	48	0.60	13.20	29.04
	72	0.63	15.43	32.29
Thompson	12	0.40	4.48	11.34
	24	0.44	8.53	19.75
	48	0.58	12.66	27.22
	72	0.61	15.22	31.20
CAM5.1	12	0.42	4.09	10.52
	24	0.42	8.33	18.92
	48	0.56	12.25	30.16
	72	0.61	15.26	33.46

2.2 FLEXPART-WRF 模拟结果

放射性物质主要通过辐射内照射和辐射外照射两种途径对人体造成危害。辐射内照射主要是放射性物质通过空气吸入和食品食入等途径进入到人体内，对人体内脏或组织器官直接照射造成损伤；辐射外照射是放射性射线从人体外对人体进行穿透照射，对人体组织器官造成损伤 (江春, 2019)。本文仅模拟台风期间 72 h 内 Cs-137 的迁移过程，故不考虑 Cs-137 的粒子衰变，从近地面空气浓度和地面累积沉降两个方面来评估 Cs-137 扩散模拟的效果。

2.2.1 Cs-137 近地面浓度空间分布

图 4—6 展示了三种方案模拟的不同时刻放射性物质 Cs-137 在近地面的扩散轨迹和空气浓度分布，从扩散情况可见，随着时间的推移，Cs-137 的浓度逐

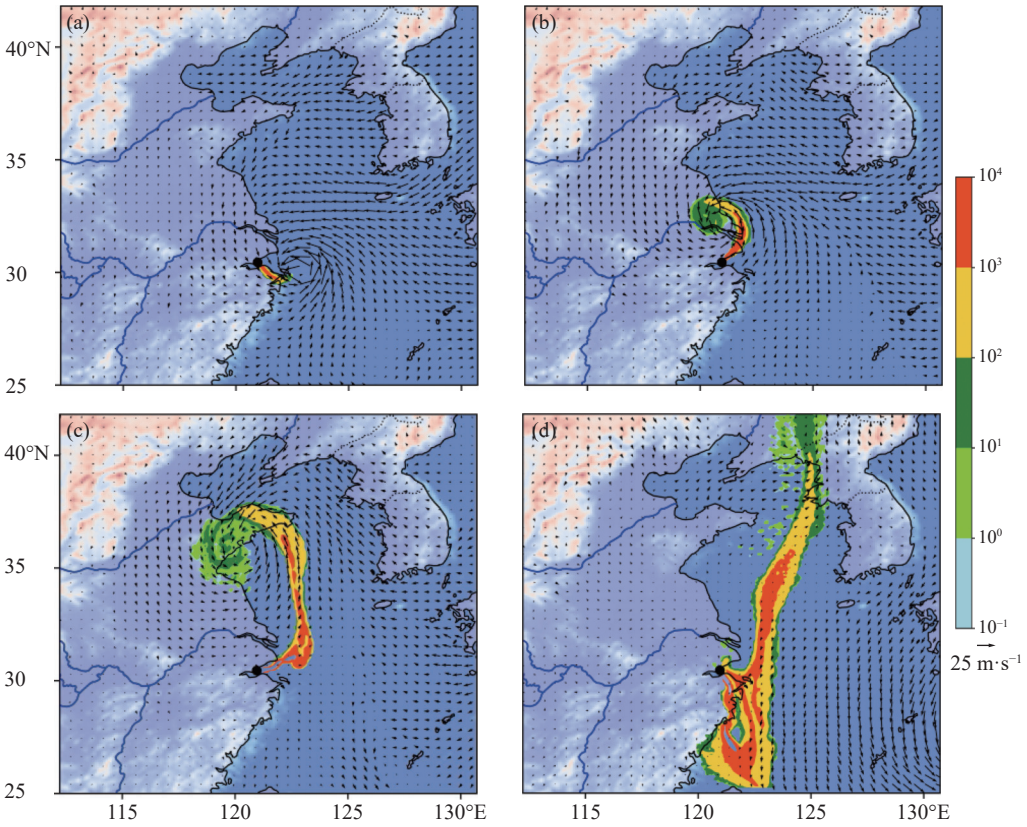


图 4 WSM3 方案模拟的 2 h (a)、12 h (b)、36 h (c)、72 h (d) 放射性物质 Cs-137 近地面扩散轨迹和空气浓度 (填色，单位：Bq·m^{-3}) 以及风速 (箭矢，单位：m·s^{-1}) 的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of the near-surface diffusion trajectory and air concentration (shaded, unit: Bq·m^{-3}) of radioactive material Cs-137, as well as wind speed (arrow, unit: m·s^{-1}) at (a) 2 h, (b) 12 h, (c) 36 h, and (d) 72 h, simulated by the WSM3 scheme

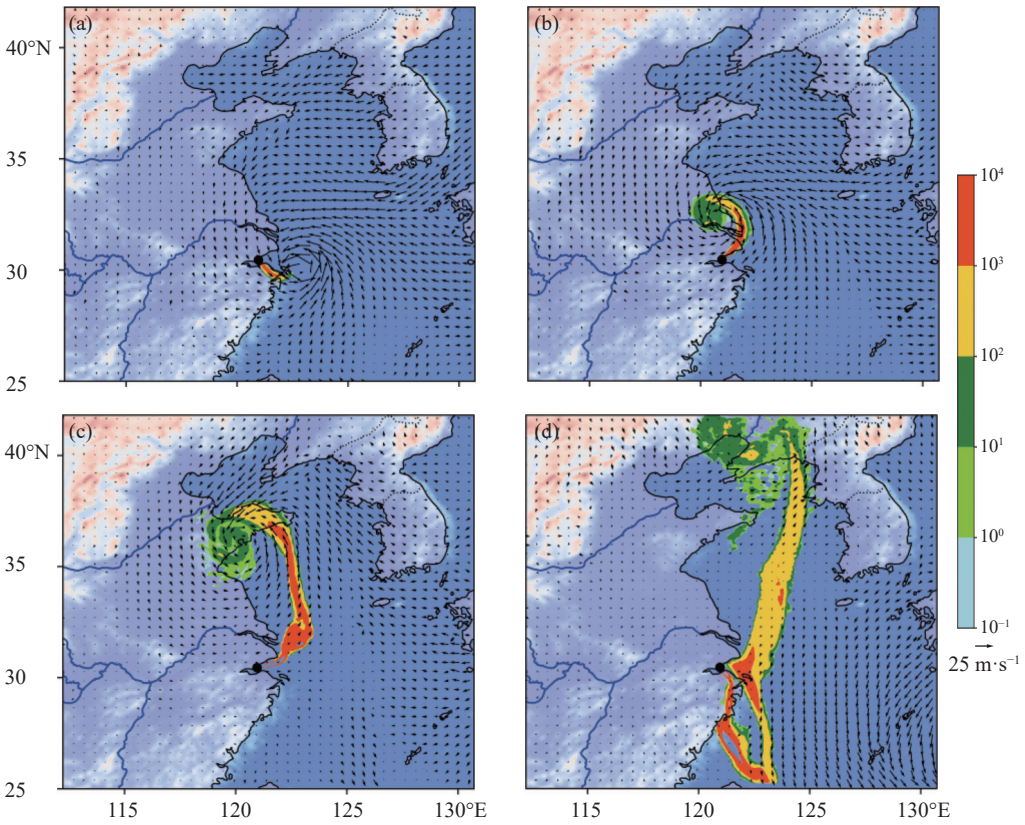


图 5 同图 4, 但为 Thompson 方案模拟结果

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for simulation results of Thompson scheme

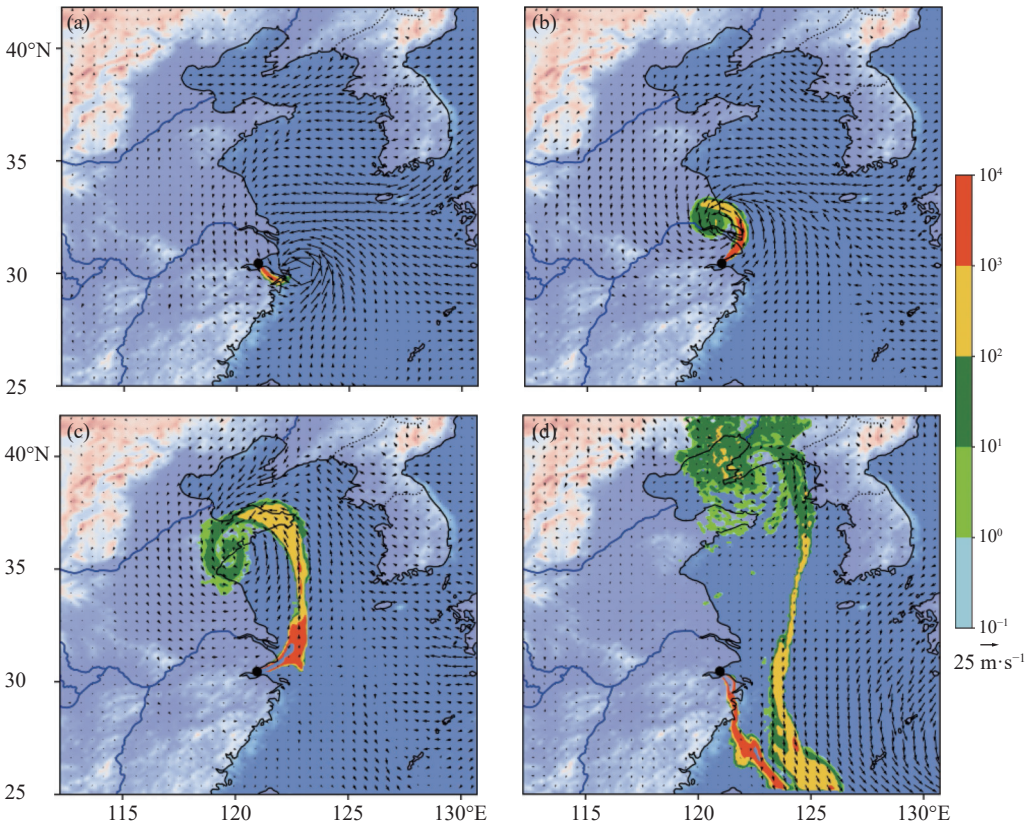


图 6 同图 4, 但为 CAM5.1 方案模拟结果

Fig. 6 Same as Fig. 4, but for simulation results of the CAM5.1 scheme

渐从点源释放位置向华东、东北和东南沿海地区迁移。由于是地面点源持续释放，事故初始时刻大量Cs-137堆积在近源区，三种方案模拟的Cs-137浓度变化基本一致。同时，初始时刻(图4a、5a、6a)，Cs-137浓度达到最大值，超过10^3 Bq·m^{-3}。随着模拟时长的增加，9月14日14时(世界时，下同)—9月16日00时(图4b—c、5b—c、6b—c)，三种方案模拟的Cs-137均从浙江舟山往北扩散，途径上海奉贤后从东海北上直达山东，扩散路径也基本一致，说明强风影响了Cs-137在空气中传播与扩散的方向。9月14日14时—9月16日00时，三种方案模拟的台风外围Cs-137浓度在近源区高达10^2~10^3 Bq·m^{-3}，而台风眼与云墙区Cs-137浓度接近10^1~10^2 Bq·m^{-3}，相比近源区稀释10^1 ~ 10^2倍，主要是由于台风过境时带来的强降雨使Cs-137沉积在地表。9月17日台风结束后(图4d、5d、6d)，三种方案模拟的Cs-137浓度扩散趋势和覆盖范围存在明显差异，浓度均向南北方向扩散，北至中国东北地区。WSM3方案模拟的Cs-137扩散中心浓度较高，海上Cs-137扩散带浓度仍高达10^3~10^4 Bq·m^{-3}(图4)。与WSM3方案相比，Thompson方案模拟的Cs-137近地面扩散轨迹中，东海一带的Cs-137浓度显著下降，东北地区的Cs-137浓度覆盖范围有所增加(图5)。CAM5.1方案模拟出两条南向的Cs-137扩散带，海上Cs-137扩散带变窄，东北地区近地面Cs-137浓度扩散范围最大(图6)。总体上，三种方案模拟的不同时刻Cs-137扩散位置均围绕在台风中心，即风眼和风暴区。受科氏效应影响，Cs-137浓度呈逆时针迁移，其扩散轨迹反映了台风期间流场的变化趋势。

2.2.2 Cs-137干沉降空间分布

放射性物质粒子在大气中运动时，受下垫面粗糙度和重力沉降等因素影响，会吸附并沉积到地面形成干沉降，粒子的干沉降速率取决于粒子属性和所在格点的土地覆盖类型(吴保见等, 2017)。图7展示了三种方案模拟的Cs-137累积干沉降的空间分布。可见三种方案均能模拟出事故情况下的Cs-137整体干沉降分布特征，在同一时刻Cs-137干沉降的范围基本相同，干沉降值介于10^{-2}~10^3 Bq·m^{-2}之间，边缘区与近源区的干沉降值相差5个量级。

2.2.3 Cs-137湿沉降空间分布

湿沉降对放射性物质的大气迁移过程具有重要意义。从图3降雨的模拟结果可见本次台风带来了大范围降雨。放射性物质从点源释放后，遇到水蒸汽时会吸附成小颗粒形成水滴或悬浮在空气中，并以这种方式从大气中沉降至地面。对比分析图8中Cs-137释放后12 h、60 h的累积湿沉降空间分布发

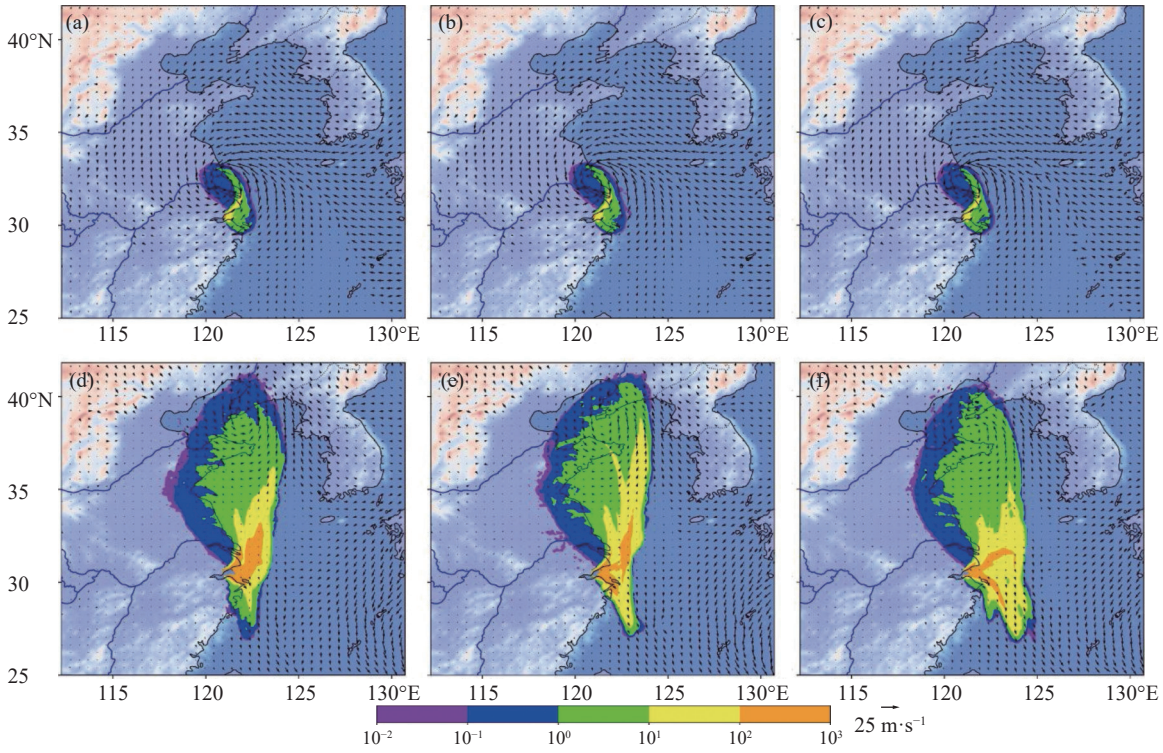


图7 WSM3 (a, d)、Thompson (b, e)、CAM5.1 (c, f)方案模拟的12 h (a, b, c)、60 h (d, e, f)放射性物质Cs-137累积干沉降(填色，单位：Bq·m^{-2})和风速(箭矢，单位：m·s^{-1})的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of cumulative dry deposition (shaded, unit: Bq·m^{-2}) of radioactive material Cs-137 and wind speed (arrow, unit: m·s^{-1}) at (a, b, c) 12 h and (d, e, f) 60 h simulated by (a, d) WSM3, (b, e) Thompson, and (c, f) CAM5.1 schemes

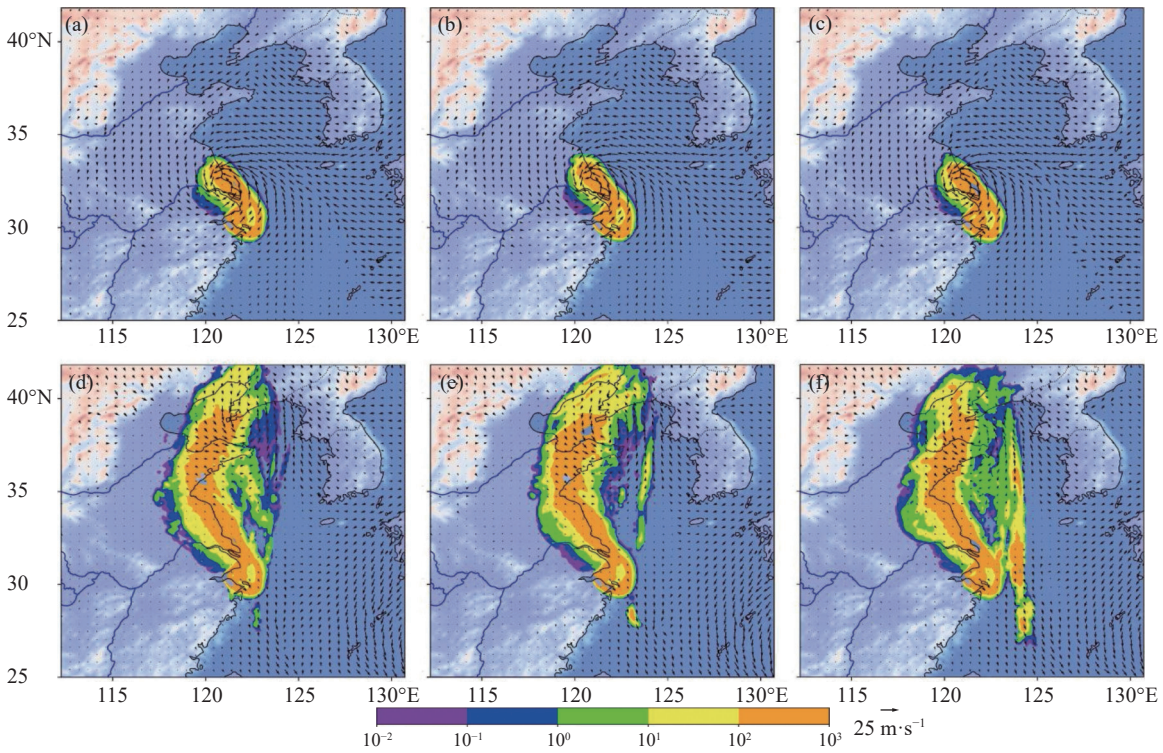


图 8 同图 7, 但为湿沉降的空间分布 (填色, 单位: Bq·m^{-2}) 以及风速 (箭矢, 单位: m·s^{-1}) 空间分布

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for the spatial distribution of wet deposition (shaded, unit: Bq·m^{-2}) and wind speed (arrow, unit: m·s^{-1})

现, Cs-137 在释放开始后, 由于重量增加和阻力增大, 大量粒子受降雨影响逐渐下沉。从 12 h 的 Cs-137 湿沉降空间分布可见, 三种方案模拟的 Cs-137 湿沉降覆盖范围差异不大, 随着时间的推移, 湿沉降范围随流场轨迹变化逐渐扩大, 同时沉降值波动较大, 降雨边缘区域湿沉降值在 10 Bq·m^{-2} 左右波动, 与风眼区 10^3 Bq·m^{-2} 相差 2 个量级, 与上文所述的近地面空气中 Cs-137 浓度被稀释 2 倍相匹配。CAM5.1 方案模拟 60 h 的 Cs-137 沉降覆盖范围最大, 集中在 1 ~ 10 Bq·m^{-2}, 与上文所述的降雨覆盖范围最广相匹配。综上, Cs-137 主要受湿沉降影响, 当降雨集中区域内的 Cs-137 空气浓度较高时, 会产生大量湿沉降, 当区域内降雨量较低时, 湿沉降量也逐渐减少。

2.2.4 Cs-137 最大干沉降时间变化

图 9a 展示了三种方案模拟的 Cs-137 最大干沉降逐时变化。从中可见, 在模拟开始后的 1 h 产生干沉降, 由于点源持续释放且风速较大, 三种方案模拟的 Cs-137 最大干沉降值均逐步增加。总体而言, Thompson 方案模拟的 Cs-137 最大干沉降值增长速度最快, 平均值为 5 445.11 Bq·m^{-2}; CAM5.1 方案模拟的 Cs-137 最大干沉值增长速度最慢, 平均值为 4 947.15 Bq·m^{-2}, 与 Thompson 方案的模拟结果相差 9.15%。

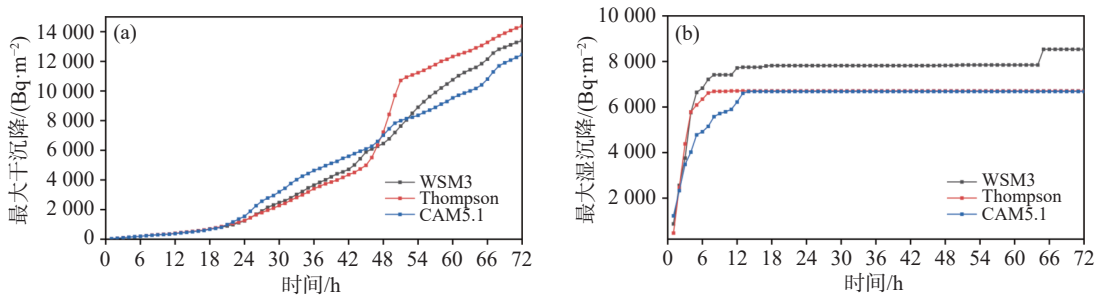


图 9 WSM3、Thompson、CAM5.1 方案模拟的放射性物质 Cs-137 最大干沉降 (a) 和最大湿沉降 (b) 逐时变化

Fig. 9 Hourly variation of (a) maximum dry deposition and (b) maximum wet deposition of radioactive materialCs-137 simulated by the WSM3, Thompson, and CAM5.1 schemes

2.2.5 Cs-137 最大湿沉降时间变化

随着降雨不断增大, 放射性物质会吸附在水滴表面, 达到一定程度后就会沉降到地表形成湿沉降。湿沉降是一个累积过程, 在强降雨的影响下, 放射性物质会被稀释和扩散, 导致其沉降量不再增加, 图 9b 反映了三种方案模拟的 Cs-137 最大湿沉降逐

时变化。初始时刻, CAM5.1 方案模拟的 Cs-137 最大湿沉降最大, 为 1 222.83 Bq·m^{-2}。在之后的 12 h 内, WSM3 方案和 Thompson 方案模拟的 Cs-137 最大湿沉降迅速上升并趋于稳定, 而 CAM5.1 方案模拟的 Cs-137 最大湿沉降增长较慢。随着时间的推移, 三种方案模拟的 Cs-137 最大湿沉降在 12 h 后基本趋于稳定, 其中 CAM5.1 方案模拟的 Cs-137 最大湿沉降最小, 稳定在 6 681.30 Bq·m^{-2}, 这与上文所述的暴雨覆盖范围最大且降雨强度最小相符。

3 结论与讨论

本文分析了 WRF 模式中 WSM3、Thompson、CAM5.1 三种云微物理参数化方案对台风期间放射性物质 Cs-137 扩散的影响, 并使用欧洲中心全球反演数据和美国宇航局 IMERG 卫星降雨数据, 对 WRF 模拟的风场和降雨进行验证分析, 通过设置假想事故, 进一步分析极端天气引起核事故时气象场对 Cs-137 浓度输运和干 (湿) 沉降分布的影响。得出主要结论如下:

(1) 三种云微物理参数化方案对风速、风向和降雨的模拟结果基本一致, Cs-137 扩散轨迹遵循台风期间的流场变化规律。总体上看, CAM5.1 方案对台风流场的模拟效果更好, 降雨覆盖面更广, 更接近实况; WSM3 方案和 Thompson 方案的模拟效果整体相似。

(2) 三种云微物理参数化方案模拟的 Cs-137 浓度扩散结果与 WRF 模拟的风场结果相匹配, 可基本反映出 Cs-137 的浓度输运和扩散特征。其中, 三种方案模拟的风眼区空气浓度随着模拟时长增加出现明显下降, 模拟浓度介于 10^0 ~ 10^2 Bq·m^{-3}, 相比近源区稀释 10^1 ~ 10^2 倍, 与降雨情况相匹配。同时, 三种方案模拟的同一时刻干沉降范围基本一致, 干沉降值介于 10^{-2} ~ 10^3 Bq·m^{-2}。

(3) 三种云微物理参数化方案模拟的 Cs-137 湿沉降结果与 WRF 模拟的降雨结果相匹配, 可基本反映出其累积特征。初始时刻, CAM5.1 方案模拟的沉降量最大; 前 12 h 内, WSM3 方案和 Thompson 方案模拟的沉降速度较 CAM5.1 方案更快, 沉降量更大; 在 12 h 以后, 三种方案模拟的最大湿沉降趋于稳定且不再增加。

本文研究了不同云微物理参数化方案对台风期间放射性物质 Cs-137 扩散的影响, 并借助假想排放源进行分析, 可为核事故下放射性物质的扩散特征及其应急响应研究提供参考。但需要指出的是, 本文仅对放射性物质 Cs-137 在三种云微物理参数化方案的浓度输运和沉降特征进行了定量分析, 对多种云微物理参数化方案模拟情况和不同天气条件下的典型扩散案例还有待深入研究。

参考文献 (References):

白莹莹, 唐红玉, 张焱.2024.重庆夏季气温和降水的周末效应初探[J].高原山地气象研究,44(1):21−30. Bai Y Y, Tang H Y, Zhang Y. 2024. Preliminary study on weekend effect of summer temperature and precipitation in Chongqing [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,44(1):21−30 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2024.02.012

顾尧,白永清,赵天良,等.2020.荆州市大气污染物周边源影响域的气候模拟研究[J].环境科学学报,41(6):2241−2249. Gu Y, Bai Y Q, Zhao T L, et al. 2020. Climate simulation on the influence domains of air pollutant sources for the urban area of Jingzhou [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,41(6):2241−2249 (in Chinese). doi:10.13671/j.hjkxxb.2020.0519

郭欢,李鸣野,张月婷,等.2023.边界层参数化方案对 FLEXPART-WRF 耦合影响的数值模拟研究—以某核电站为例[J].四川环境,42(1):132−41. Guo H, Li M Y, Zhang Y T, et al. 2023. Numerical simulation of the influence of boundary layer parameterization schemes on FLEXPART-WRF Hybrid Model-Taking a nuclear power plant as an example [J]. Sichuan Environment,42(1):132−41 (in Chinese). doi:10.14034/j.cnki.schj.2023.01.021

韩芙蓉,鹿翔,吴天贻,等.2023.多卫星融合降雨产品对 2015—2020 年登录浙江台风降雨的监测能力评估[J].暴雨灾害,42(1):57−66. Han F R, Lu X, Wu T Y, et al. 2023. Evaluation of monitoring ability of the integrated multi-satellite retrievals for precipitation during typhoon landing in Zhejiang from 2015 to 2020 [J]. Torrential Rain and Disasters,42(1):57−66 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−015

何欢,赵碧云,韦凯华,等.2020.荆门市冬季 $PM_{2.5}$ 传输轨迹及潜在源分析[J].沙漠与绿洲气象,14(6):121−126. He H, Zhao B Y, Wei K H, et al. 2020. Analysis of $PM_{2.5}$ transportation traces and potential sources during the winter in Jingmen [J]. Desert and Oasis Mateorology, 14(6):121−126 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2020.06.016

江春.2019.核应急监测中辐射环境自动监测系统的应用分析[J].环境与发展,31(9):165−166. Jiang C. 2019. Application analysis of radiation environment automatic monitoring system in nuclear emergency monitoring [J]. Environment and Development,31(9):165−166 (in Chinese). doi:10.16647/j.cnki.cn15−1369/X.2019.09.096

王颖,梁依玲,王丽霞,等.2015.复杂地形气象场对污染物浓度空间分布影响的研究[J].沙漠与绿洲气象,9(2):69−74. Wang Y, Liang Y L, Wang L X, et al. 2015. Research on the impact of meteorological field on the spatial distribution of the pollutant concentration in complex terrain [J]. Desert and Oasis Mateorology,9(2):69−74 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1002−0799.2015.02.011

吴保见,王昆,贾立,等.2017.源项对 FLEXPART 模式模拟福岛核事故放射性物质长距离传输的影响[J].气候与环境研究,22(1):10−22. Wu B J, Wang K, Jia L, et al. 2017. Influences of source term on long-range transport of radionuclides from the Fukushima Daiichi nuclear accident with FLEXPART model [J]. Climatic and Environmental Research,22(1):10−22 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9585.

2016.15246

余钟奇,马井会,曹钰,等.2019.影响上海 $PM_{2.5}$ 污染不同源地和路径的数值模拟[J].中国环境科学,39(1):21−31. Yu Z Q, Ma J H, Cao Y, et al. 2019. Numerical simulations of sources and transport pathwaysof different $PM_{2.5}$ pollution types in Shanghai [J]. China Environmental Science,39(1):21−31 (in Chinese). doi:10.19674/j.cnki.issn1000−6923.2019.0003

Arnold D, Maurer C, Wotawa G, et al. 2014. Influence of the meteorological input on the atmospheric transport modelling with FLEXPART of radionuclides from the Fukushima Daiichi nuclear accident [J]. Ecology Environment & Conservation,139:212−225. doi:10.1016/j.jenvrad.2014.02.013

Beck H E, Dijk A I J M V, Larraondo P R, et al. 2022. MSWX: Global 3-hourly 0.1° bias-correctedmeteorological data including near-real-time updates and forecast ensembles [J]. Bulletin of the American Meteorological Society,103(3):710−732. doi:10.1175/BAMS−D−21−0145.1

Brioude J, Arnold D, Stohl A, et al. 2013. The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART-WRF version 3.1 [J]. Geoscientific Model Development,6(6):1889−1904. doi:10.5194/gmd−6−1889−2013

Colle B A, Garvert M F, Wolfe B, et al. 2005. The 13-14 December 2001 IMPROVE-2 event. Part III: simulated microphysical budgets and sensitivity studies [J]. Journal of Atmospheric Sciences,62(10):3535−3558. doi:10.1175/JAS3552.1

Guo L, Chen B, Zhang H, et al. 2018. Improving $PM_{2.5}$ forecasting and emission estimation based onthe bayesian optimization method and the coupled FLEXPART-WRF Model [J]. Atmosphere,9(11):428. doi:10.3390/atmos9110428

Hong S Y, Dudhia J, Chen S H. 2004. A Revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation [J]. Monthly Weather Review,132:103−120. doi:10.1175/1520−0493(2004)132<0103:ARATIM>2.0.CO;2

Hui T, Westermone H O, Frode S, et al. 2022. Modelling the 2021 East Asia super dust storm using FLEXPART and FLEXDUST and its comparison with reanalyses and observations [J]. Frontiers in Environmental Science,10:13875. doi:10.3389/FENVS.2022.1013875

Idrees A, Bin M O, Rizwan A, et al. 2021. Real-time simulation of an accidental passive transport of radioactive pollutant from the proposed nuclear power plant [J]. Journal of Radiological Protection: Official Journal of the Society for Radiological Protection,41(4):920−939. doi:10.1088/1361−6498/ABF3AF

Long P K, Hien P D, Quang N H. 2018. Atmospheric transport of ^{131}I and ^{137}Cs from Fukushima by the East Asian northeast monsoon [J]. Journal of Environmental Radioactivity,197:74−80. doi:10.1016/j.jenvrad.2018.12.003

Madala S, Satyanarayana A N V, Srinivas C V. 2015. Simulation of atmospheric dispersion of NO_X over complex terrain region of Ranchi with FLEXPART-WRF by incorporation of improved turbulence intensity relationships [J]. Atmospheric Environment,123:139−155. doi:10.1016/j.atmosenv.2015.10.090

Peter B, Arjo S, Dominik B, et al. 2022. High-resolution inverse modelling of European CH4 emissionsusing the novel FLEXPART-COSMO TM5 4DVAR I nverse modelling system [J]. Atmospheric Chemistry and Physics,22(20):13243−13268. doi:10.5194/ACP−22−13243−2022

Preez D J D, Bencherif H, Bègue N, et al. 2020. Investigating the large-scale transport of a volcanic plume and the impact on a secondary site [J]. Atmosphere,11(5):548. doi:10.3390/atmos11050548

Rakesh P T, Revanth R B, Srinivas C V, et al. 2021. Validation of a modified FLEXPART model for short-range radiological dispersion and dose assessments in ONERS Decision Support System [J]. Progress in Nuclear Energy,136:103739. doi:10.1016/J.PNUCENE.2021.103739

Rakesh P T, Venkatesan R, Hedde T, et al. 2015. Simulation of radioactive plume gamma dose over a complex terrain using Lagrangian particle dispersion model [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 145:30−39. doi:10.1016/j.jenvrad.2015.03.021

Srinivas C V, Prasad K B R R H, Naidu C V, et al. 2016. Sensitivity analysis of atmospheric dispersion simulations by FLEXPART to the WRF-Simulated meteorological predictions in a coastal environment [J]. Pure and Applied Geophysics,173(2):675−700. doi:10.1007/s00024−015−1104−z

Thompson G, Field P R, Rasmussen R M, et al. 2008. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: implementation of a new snow parameterization [J]. Monthly Weather Review,12:5095−5115. doi:10.1175/2008MWR2387.1

Thompson G, Rasmussen R M, Manning K. 2004. Explicit forecasts of winter precipitation using an improvedbulk microphysics scheme. Part I: description and sensitivity analysis [J]. Monthly Weather Review,132(2):519−542. doi:10.1175/1520−0493(2004)132

Zamora L M, Kahn R A, Nikaloas E, et al. 2022. Comparisons between the distributions of dust and combustion aerosols in MERRA-2, FLEXPART, and CALIPSO and implications for deposition freezing over wintertime Siberia [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 22(18):12269−12285. doi:10.5194/ACP−22−12269−2022

(责任编辑　唐永兰)