

多尺度扩散模式对 ETEX-1 试验的再现模拟

黄莎, 赵多新, 陈龙泉, 吕明华, 徐向军

中国辐射防护研究院, 太原 030006

摘要 根据非静力动力学气象模式和拉格朗日粒子模式建立的多尺度模式, 利用欧洲预报数据 ECMWF 和不同分辨率的地形数据, 对欧洲长距离示踪试验 (ETEX) 的扩散过程进行阶段性再现模拟, 并将多尺度扩散模拟结果与 ETEX 试验监测结果进行对比分析, 以考查该模式在多尺度扩散模拟中的应用。研究表明, 多尺度扩散模拟结果与观测结果具有较高的空间分布相关性; 扩散模拟结果有效地反应了当时的区域流场特征。

关键词 多尺度; 扩散; 欧洲长距离示踪试验; 数值模拟

1 概述

放射性物质在长距离迁移过程中扩散浓度对大气环境影响严重, 开展大气示踪物在不同尺度的扩散模拟研究对于描述污染物迁移扩散轨迹、放射性物质扩散范围及对人体的影响具有重要意义。在类似日本福岛核等事故中, 人们不仅关注事故释放条件下放射性气体长距离输送过程, 同样关注放射性气体短距离释放后对邻近区域人群的危害。在这种情形下, 只利用单一尺度的技术难以同时满足各方需要。同时, 由于不同尺度模式所使用的基础信息在数据分辨上存在较大差异, 对同一释放过程不同模式可能给出了迥异的迁移预报结果, 这又使得决策者难以对事故后果做出合理评估。

从实际运用角度出发, 主要核事故后果评价系统, 如美国的 ARAC 系统、欧共体的 Rodos 系统、日本的 Speedi/Wspeedi 系统等都非常关注多尺度扩散模拟技术的发展, 已部分或基本解决了多尺度扩散模拟问题。可调整网格多尺度环境模式 Omega 作为一种先进的大气模拟模式, 以其特有的网格划分方式、复杂地形的边界处理及网格自动调节能力, 实现了对流场、扩散的全尺度模拟^[1]。目前, 加拿大、英国、法国、日本等都建立了程度不同的多尺度统一模式, 取代多套不同尺度模式共存的数值模拟系统。这类通用模式尺度范围涵盖全球到中尺度, 但所选取的分辨条件各有差异^[2]。

中尺度模拟的水平分辨至少在 1 km 以上, 尺度范围通常在几百 km, 污染物扩散浓度分布关心区域主要集中在水平分辨较高的小尺度, 污染物根据风速情况可以传播到较远的大尺度。污染物长距离迁移在不同空间范围内形成的浓度场

与相应空间的流场密切相关, 获取污染物长距离迁移过程中浓度在不同尺度、不同分辨网格中的分布情况是多尺度扩散模拟关注的主要方面, 而不同尺度的配套风场的获得在多尺度扩散模拟中起关键作用。

大气污染扩散模式结合污染物浓度和气象资料定量分析污染物在大气中的输送、扩散特征。大气运动涉及多种物理过程, 包括不同的空间和时间尺度。当研究对象受多种尺度影响时, 需对不同尺度进行模拟, 因此选择一套适用于不同尺度的模式是必要的。

2 多尺度模式介绍

大气运动是多种尺度大气动力过程相互作用的统一, 能量分布在运动过程中实现各种尺度间的相互转换^[3]。过去由于计算能力和计算技术的限制, 研究大气运动时, 根据模拟的空间尺度分为小尺度模拟、中尺度模拟和大尺度模拟。随着计算能力和技术的进步, 数值模式向全球和细网格发展, 大气环流模式和中尺度模式的差别开始模糊, 出现了全球中尺度模式和数值模拟; 精细多尺度模式模拟开始用于中、短期数值模拟。在构造多尺度大气数值模式时, 通用模式方程、网格设计、计算方法及物理过程、动力学性质等是关注的主要方面^[2-5]。

日本开发的阴阳网格上的大气海洋耦合模式和固体地球动力模型已经进入试验应用阶段^[4]。在阴阳网格上改进的多尺度模式 Grapes^[6] 是中国在研究多尺度模拟预报领域上的重大突破, 该模式在垂直网格的设计上, 采用 Charner-Phillios

收稿日期: 2017-01-05; 修回日期: 2017-06-21

作者简介: 黄莎, 助理研究员, 研究方向为大气扩散的数值模拟, 电子信箱: yiluo224@163.com

引用格式: 黄莎, 赵多新, 陈龙泉, 等. 多尺度扩散模式对 ETEX-1 试验的再现模拟[J]. 科技导报, 2017, 35(13): 37-44; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.11.005

跳点网格(简称CP网格)以减小虚假小尺度波动和垂直方向的虚假计算。

在垂直尺度和水平尺度的比例较小时,静力平衡假设成立,能有效地滤去垂直声波并抑制其发展和传播。但当水平分辨率提高(<5 km)时,非静力平衡动力过程显著。

多尺度模式对不同尺度范围的天气过程进行模拟,从大尺度到小尺度,不可避免地需对深厚大气进行模拟,需考虑垂直加速度对模式的影响。Staniforth 根据方程组是适用于深厚大气还是浅薄大气、是否忽略垂直加速度项将模式划分为完全可压缩的 Navier-Stokes 方程、非静力原始方程、准静力原始方程和静力原始方程^[9]。

英国气象局在非静力模式中采用完全可压缩 Navier-Stokes 方程,这与中国气象局研发的 Grapes 模式相同,模式几乎包含了大气中各种运动尺度,同时考虑了科氏力分量、球面半径与球面曲率等影响,采用深厚大气近似,不仅适用于模拟等温层和中间层,也为模拟行星大气提供了良好的基础。

目前,较为知名的非静力中尺度模式有 WRF、RAMS 和 ARPC,这 3 种模式为预报强对流,都采用深对流的大气方程组,即密度是可压缩的,因而模式中包含了快速的声波,限制了积分步长,计算耗时较长。各模式都有完备的初始化方案和多种选择的参数化方案,可模拟多种大气过程,如强对流、降水、辐射湍流等。

区域气象模拟系统 RAMS 由美国科罗拉多州立大学开发,该模式基于 3 维非静力学、热力学和大气动力学中的完全可压方程建立,在水平方向上选择旋转的极射赤面投影,在垂直方向上选择随地坐标,采用 Arakawa-C 网格,考虑侧边界及上边界条件及多种微物理过程。

Zhang 等^[7]利用 VTMX 试验观测数据,检验了 MM5、RAMS 和 Eta 模式在高分辨率时(水平 1 km)的模式性能,表明 3 个模式有一个共同特点,即模拟的地面温度偏低、逆温偏弱、风速和风向误差较大,但是 MM5 模式和 RAMS 模式能更好地捕捉山谷风环流。Cox 等^[8]比较了 RAMS、MM5、NO-PAPS6 和 RWM 4 种中尺度模式在世界不同区域的模拟性能,结果显示,RAMS 模式模拟性能最佳,MM5 次之。

Pielke 等^[9]讨论了区域大气模拟系统 RAMS 在以下几方面的应用,例如大涡模拟(LES)、雷暴预报、积云区域、中尺度对流系统、中纬度卷云、冬季风暴、动力或热力驱动的中尺度系统及中尺度的大气扩散等。表明其对微尺度现象如龙卷风、边界层的涡旋都能进行模拟。双向的交互网格嵌套使得 RAMS 能够描述一个大尺度区域,如北半球,并能逐渐嵌套到较小的尺度对雷暴等小尺度天气系统进行模拟。RAMS 的非静力选项能对所有大气相关空间尺度的运动进行描述。

基于以上 RAMS 模式的特点,本文采用 RAMS 模式进行不同尺度气象场的模拟,以获得多尺度特征的气象条件。

国内早期对大气扩散的评价主要使用高斯公式来进行,其后随着计算条件的改善,随机粒子模型也被广泛应用于大气扩散的模拟。国内诸多学者在早期即使用蒙特卡罗方法

对扩散过程进行了研究,同时建立了不同特点的扩散模型。相对于高斯模型,蒙特卡罗模型对扩散过程的模拟更加接近实际情形,古德军^[10]分别用随机粒子游走模式与高斯模式模拟了 3 种源高下的横向积分浓度,并将结果与水槽模拟结果进行对比,发现随机粒子游走模式在污染物分布特征的模拟上明显优于高斯模式的结果,特别是随机粒子游走模式考虑了垂直方向湍流的不均匀,在垂直方向上能模拟出高斯模式所不能模拟的特征。用蒙特卡罗方法模拟污染物在大气中的迁移扩散是拉格朗日方法的一种,该方法通过大量粒子的统计平均描述污染物的扩散程度。本文多尺度的扩散模拟选择拉格朗日粒子模式。该模式以随机质点代表扩散物质,通过描述随机质点在大气中的扩散规律模拟污染物的扩散。

粒子模型相对欧拉模型简单易实现且不会出现数值不稳定等情况,使用时有其自身的特点:粒子扩散的结果取决于气象场,因此使用粒子模型模拟污染物的扩散可以充分反映流场对于污染物扩散的影响,特别是在复杂地形下,粒子模型可以模拟出污染物在地形影响下的扩散规律及特点;此外,粒子模型是以大批粒子的运动表征污染物的扩散规律,因此它可以直观地反应污染物迁移的轨迹及污染物浓度值的相对大小。

随机粒子模型以多尺度气象场驱动,模型自身计算湍流场,经过粒子扩散过程,计算粒子的分布并将其转化为空间浓度的分布。本文中使用的拉格朗日粒子模式为自主开发,建立模型采用的方法主要有:1) Mellor-Yamada 2.0 方案计算边界层参数;2) Hanna 方案计算边界层参数;3) 雷孝恩干湿沉积方案计算污染物的沉积;4) 核函数对污染物浓度进行处理。Mellor-Yamada 边界层闭合方案被广泛应用于大气海洋的边界层预报,如著名的 Mellor-Yamada 2.5 阶方案由于形式简单、模拟效果好而被广泛用于气象模型的边界层模拟,如 WRF、RAMS、ETA、ARPS 等气象预报模式^[11],建立的随机粒子模型使用了 Mellor-Yamada 2.0 方案,它属于 1 阶闭合的方案,通过湍能诊断方程可以很快求解模型所需的湍流脉动量,2 层方案相对于 2.5 层方案形式更简单,其对于湍流脉动项以及摩擦速度的计算结果更简便^[12-16];Hanna 方案^[17]是基于湍流统计理论得出的不同稳定度条件下湍流脉动量的算法,其在近地层大气扩散的计算中应用广泛。Mellor-Yamada 2.0 对于均匀流场的模拟与高阶闭合方案计算效果相同,可用于计算整个边界层内的湍流脉动量,只是在强对流等条件下模拟效果下降;Hanna 方案由于在近地层以上并没有固定的风廓线公式,且由于是经验公式,因此一般情景下模拟效果不如 Mellor-Yamada 2.0,但是根据具体厂址,对计算形式调整后又可以得到不受均匀流场限制的参数化公式。因此模型选择使用两种方案进行边界层参数的计算,以求得到较真实的湍流分布。

干湿沉积方案采用雷孝恩的参数化方案^[18],其对于干湿沉积因子的计算方案简单、易实现,且模拟效果较好;对于浓度结果采用核函数处理,虽然核函数的应用会在污染源附近

造成一定的人为扩散,但是对结果的影响不大,且采用核函数后使得计算粒子数大大减小,不仅提高计算速度,同时也使结果更连续、与实际更接近。

本文选择基于非静力动力气象学模式 RAMS 和拉格朗日粒子模式建立的多尺度模式对欧洲长距离扩散试验过程进行再现模拟,并对模拟结果与欧洲 168 个观测站点结果进行对比分析,以讨论该多尺度扩散模式在不同尺度扩散试验中的应用情况。

3 案例设定及结果分析

3.1 案例设定

对欧洲长距离示踪实验第 1 次试验是较为成功的、大尺度范围内有地面浓度监测值的扩散试验,其覆盖面广,试验范围涉及欧洲多个国家。根据欧洲长距离扩散试验的时间及其相关气象观测数据及现场浓度数据,选用欧洲预报中心相应时段的 ECMWF 数据作为初始场,数据网格精度为 1° ,地形采用分辨为 $30''$ 的美国地理学会(UGS)地形数据。选择包括模拟时段在内的 84 h 进行模拟,即 1994-10-23-1200—1994-10-26-1800(UTC)。

对欧洲地区进行模拟区网格划分,大尺度网格分辨设定为 50 km,模拟区中心点设定为 $49^\circ\text{N}, 12^\circ\text{E}$;中尺度网格分辨设定为 25 km,模拟区中心设定为 $50.8149^\circ\text{N}, 0.4968^\circ\text{W}$;小尺度网格分辨设定为 5 km,模拟区中心设定为 $48.5335^\circ\text{N}, 0.6059^\circ\text{W}$;大、中、小尺度模拟区网格分别为 $67 \times 67, 43 \times 43, 61 \times 61$,地理分布及网格划分如图 1 所示。

扩散模拟与源强、释放时间、释放高度等密切相关。与实际欧洲长距离扩散保持一致性,本文选取 C_7F_{14} 为示踪物,1994-10-23-1600(UTC 时间)为起始释放时间,从法国 Monferfil 连续释放 12 h,释放点的坐标为 $48^\circ 3' 30''\text{N}, 2^\circ 0' 30''\text{W}$,释放速率为 7.98 g/s ,总释放量为 340 kg,释放高度设定为离地面 8 m。

设定每个时间步长释放的示踪粒子个数为 2000,同时,调整扩散模拟的边界层高度。粒子扩散模式模拟从释放发生开始各粒子的空间位置,与监测结果进行比较分析。

3.2 模拟结果分析

模拟区西北部北海的占地面积较大,在模拟时间段内多出现环流。在以往工作中,对多尺度模拟风场的连续性和有效性进行了大量定性分析和定量分析,在此处不进行分析,认为模拟的多尺度流场时有效的,文中仅对模拟风场进行定性分析。

图 2 给出不同尺度风场随时间的变化情况。从模拟地面风场的定性分析可以看出,在多尺度模拟区域范围内,模拟风场能较好地反映地面风场受地形影响而产生的风场变化情况,在模拟时段的大多数时刻,地面风场均体现从海面吹向陆面的海风。由于模拟区域较大,模拟区域包含了北海、波罗的海、地中海、第勒尼安海及部分北大西洋等,相应地在

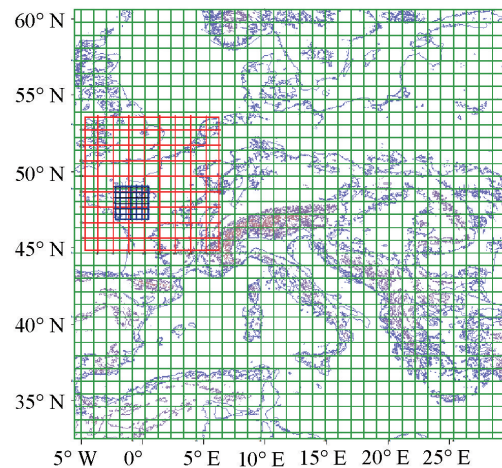


图 1 多尺度模拟区分布

Fig. 1 Distribution of multiscale simulation regions

模拟区西部出现从北大西洋吹向陆面的海风,在北海、地中海及第勒尼安海附近多有环流出现。同时,不同尺度间风场同样随地形发生变化,定性分析认为,多尺度风场模拟是成功的,能够反映地形的复杂程度。

扩散场的模拟结果精度在较大程度上取决于模拟区域网格的划分,不同位置物理量信息不同必然造成模拟结果在不同位置的差异。在本次模拟中,不同区域风场的模拟选用相同来源的初始场,以减小不同尺度之间模拟结果的差异,同时保证风场的连贯性。但是,由于不同尺度之间网格分辨的差异,在相邻模拟区域内,较高网格分辨的模拟区扩散场模拟必然会因为风场等物理变量在网格间存在差异,使得在较低网格分辨的模拟区域内出现不一致的情况,但仅在较高网格分辨的模拟区边缘出现。

随着模拟时间的增加,示踪粒子向远距离扩散,由小尺度向中尺度迁移,到达边界后向大尺度迁移,示踪物分布范围更广。本次模拟将示踪粒子在不同尺度范围内扩散所造成的地面最大浓度分布与欧洲长距离迁移扩散试验的 168 个监测站点观测结果进行比较(图 3)。

图 4 给出示踪粒子在本次扩散过程中在不同尺度范围的影响区域。结合模拟地面风场分布进行分析认为,地面最大过境浓度分布与模拟风场结果匹配较好,从释放点到大尺度的扩散过程中,呈现往东北方扩散的趋势,与 ETEX 实验官网上公布结果一致;欧洲有浓度观测的站点分布及相应最大地面浓度分布与模拟结果的地面最大过境浓度趋势保持一致,认为本次模拟扩散场分布情况与实际观测情况保持较好的匹配性。

在对扩散过程进行模拟时,设定单位时间步长释放粒子数为 2000 个,模拟高度为 4754 m,该次模拟过程的地面最大过境浓度分布基本覆盖观测站点。对不同区域内观测站点

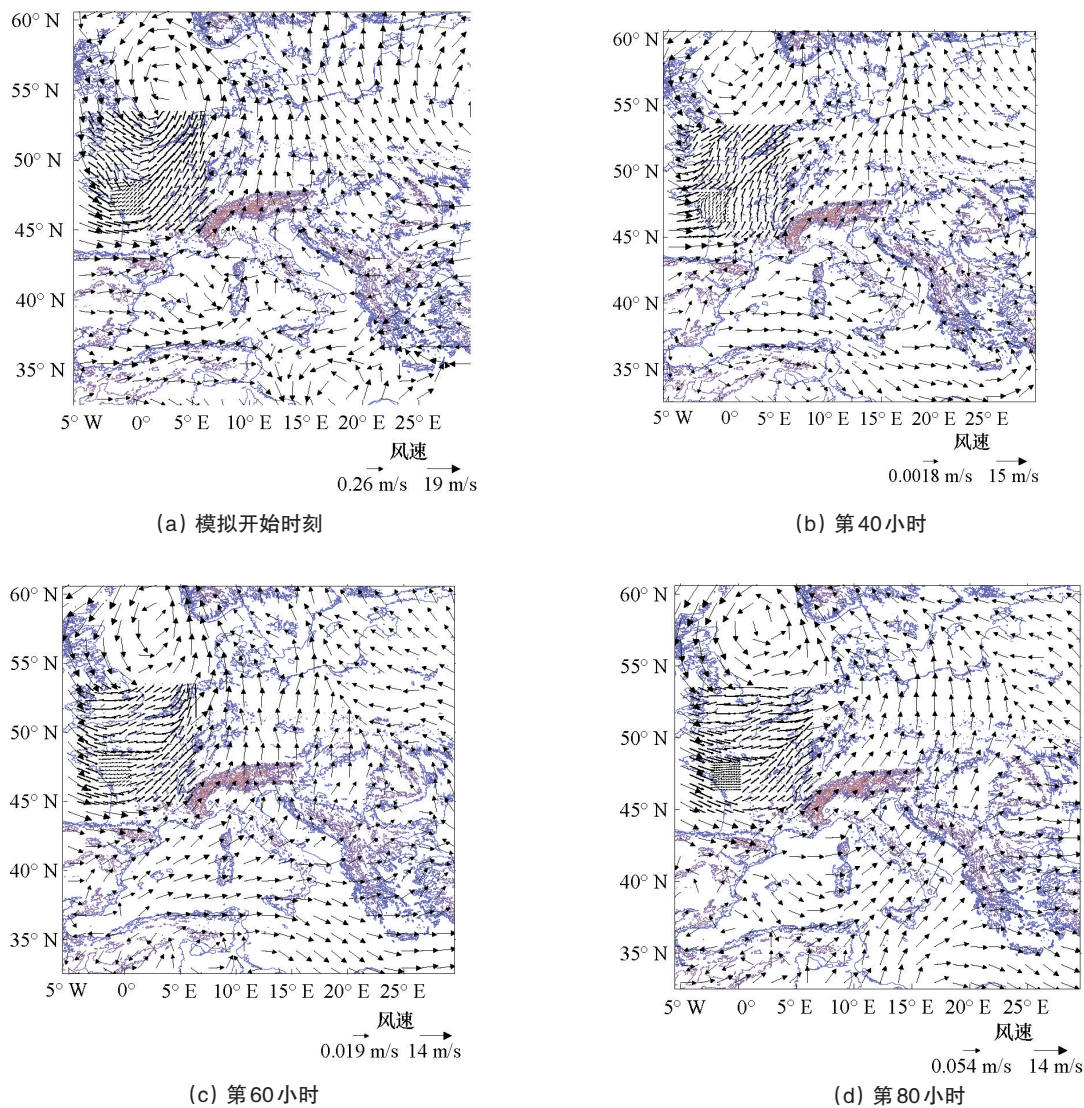


图2 不同尺度随时间的地面风场分布

Fig. 2 Distributions of ground wind field with different scales over time

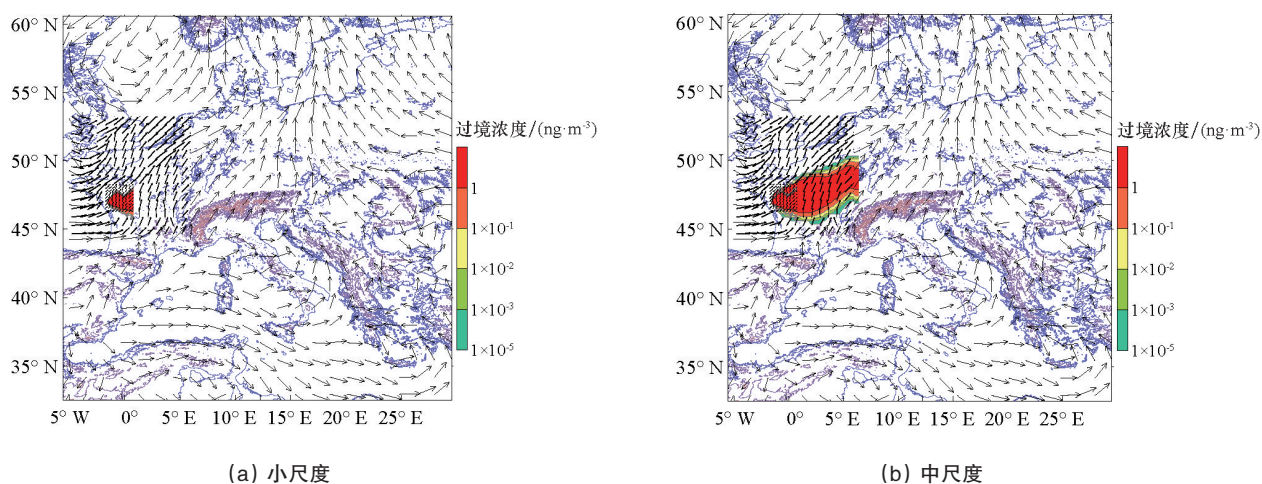


图3 地面最大过境浓度位置分布

Fig. 3 Positions distributions of maximum transit concentration on the ground

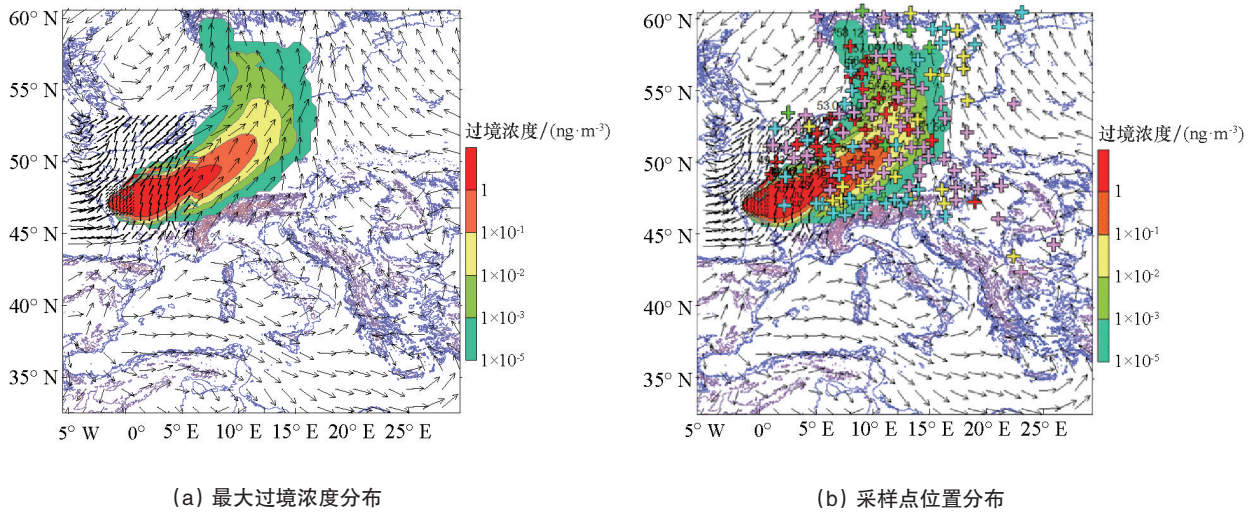


图4 大尺度地面最大过境浓度及采样点位置分布
Fig. 4 Maximum transit concentrations and location of sampling points on large scale

处的模拟结果与欧洲 168 个观测站点的浓度结果关于相关系数 (*PCC*)、均方根误差 (*RMSE*)、空间分布 (*FMS*)、偏差 (*DIFF*)、平均误差 (*BIAS*) 进行分析, 得出图 5~图 9。

时间表示从释放开始, 每隔 3 h 进行的时间排序, 各尺度模拟区范围内的模拟结果与观测结果相关性在时间分布上存在较大差异; 均方根误差在中小尺度区域内值较低, 在大

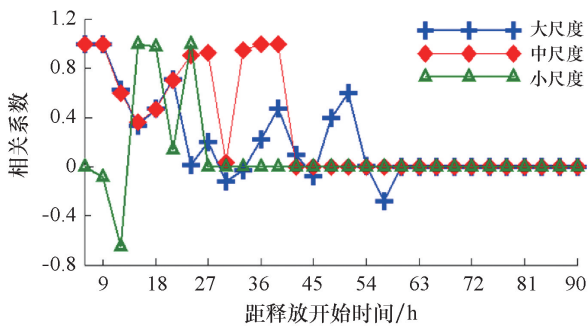


图5 模拟结果与观测结果相关系数随时间增加的分布情况
Fig. 5 Correlation coefficients of simulation results and observations over time

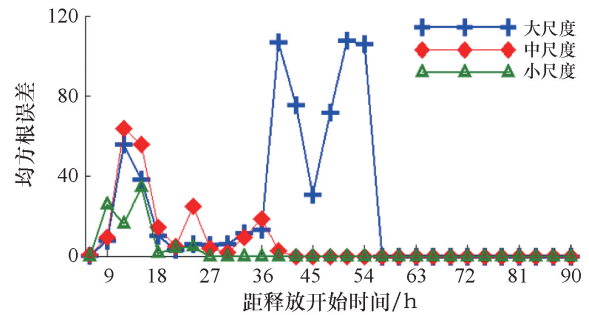


图6 模拟结果与观测结果均方根误差随时间增加的分布情况
Fig. 6 Root mean square error of simulation results and observations over time

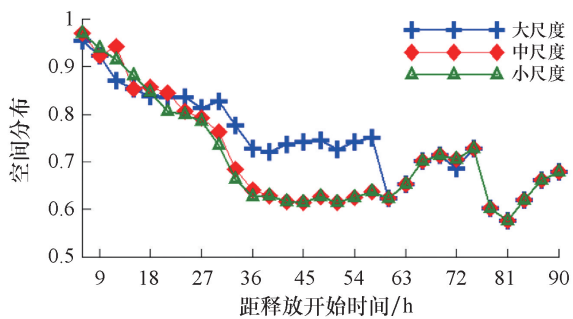


图7 模拟结果与观测结果空间分布关系随时间增加的分布情况
Fig. 7 Spatial distribution of simulation results and observations over time

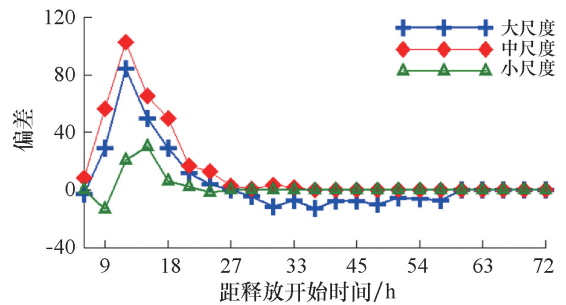


图8 模拟结果与观测结果偏差随时间增加的分布情况
Fig. 8 Deviations of simulated results and observations over time

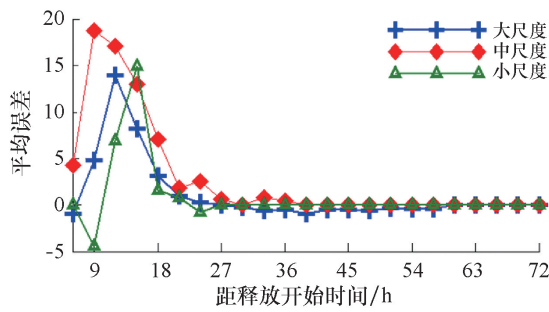


图9 模拟结果与观测结果平均误差随时间增加的分布情况

Fig. 9 Average error of simulation result and observations over time

尺度区域出现个别较大值;从空间分布统计可知,每个时刻观测结果与模拟结果的匹配情况较好,与欧洲长距离扩散试验官网上公布数据比较,本次模拟结果的空间分布与实际情况的匹配情况较好,除一个时刻出现 *FMS* 值为 0.576 外,其他时刻 *FMS* 值均在 0.6 以上,认为模拟成功。

从相关性分析可以看出,小尺度范围内,随着烟团的移动,示踪粒子离开小尺度区域进入中尺度区域,*PCC* 统计值变为 0;同样,当示踪粒子离开中尺度区域时,*PCC* 统计值变为 0;在大尺度区域,随着模拟时间的增加,示踪粒子由于沉积作用浓度值逐渐降低,最后消散。从相关性和均方差分析均可反映示踪粒子从释放到消散、从小尺度向大尺度扩散的过程。但在小尺度区域,由于单位时间内释放的粒子数较

多,扩散时间短,烟羽未能充分扩散,易造成局部浓度过大,因而出现在释放初期小尺度区域内模拟结果与观测结果的标准均方差出现较大值、两者相关性较低的情况。*FMS* 统计结果的较高值分布表明,在不同尺度区域内,模拟结果与观测结果都能保持较高的空间分布相关。

对于扩散模式可能对模拟结果相关性造成的影响进行分析,选取具有代表性的个别站点,在各观测时刻将站点的模拟值与观测值进行分析,图 10 及表 1 为选取的 4 个代表性站点模拟值与观测值的时间分布情况。

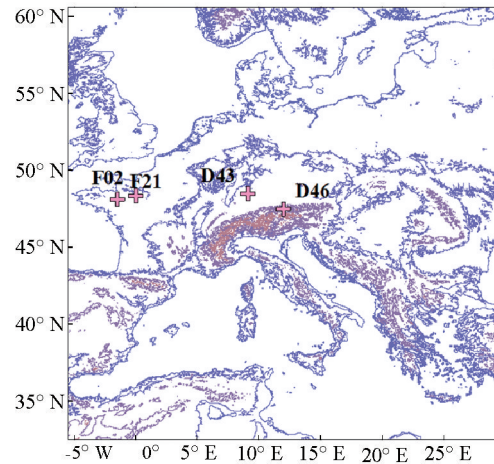


图 10 代表性站点的位置分布

Fig. 10 Location of representative sites

表 1 大尺度区域代表站点模拟浓度结果与实际观测结果的时间分布情况(单位:ng·m⁻³)

Table 1 Simulated results and observations of large scale area representative stations (unit: ng·m⁻³)

时间 /h	F02		F21		D43		D46	
	Alencon		Rennes		Stuttgart-Echterdingen		Wendelstein	
	模拟	观测	模拟	观测	模拟	观测	模拟	观测
3	0	0.03	0	0.9	0	-0.99	0	-0.99
6	0.029	0.98	7.493	9.29	0	0	0	0
9	2.442	1.92	41.259	12.57	0	0	0	-0.88
12	18.901	0.03	69.835	2.68	0	0	0	-0.88
15	52.448	1.64	79.294	0	0	0	0	-0.88
18	16.468	3.23	16.306	0.87	0	0	0	-0.88
21	6.906	0.78	1.047	0.92	0	0.01	0	-0.88
24	0.639	0.01	0.009	0	0	0.03	0	-0.88
27	0.005	0.02	0	0	0.003	0.03	0	-0.88
30	0	0.02	0	0	0.008	0.01	0	0
33	0	0.01	0	0	0.001	0.02	0	0
36	0	0.02	0	0	0	0	0	0
39	0	0.01	0	0	0	-0.88	0	0
42	0	0	0	0	0	-0.88	0	0
45	0	0	0	0	0	-0.88	0	0
48	0	0	0	0.01	0	-0.88	0	0
51	0	0	0	0	0	-0.88	0	0

51 h后观测结果和模拟结果均无数据,因此在表中不予体现。从上表可以看出,在站点F21和站点D43处,观测结果显示的烟羽浓度峰值出现在模拟结果浓度峰值出现之前,在站点F02处,观测结果显示的烟羽浓度峰值出现在模拟结果浓度峰值出现之后,站点D46无有效观测数据。其中标识“-0.88”表示该站点位置能够检测到浓度,但未能给出有效数据,标识“-0.99”表示该站点无样本信息或未对采样结果进行分析,在进行统计时剔除。

综合上述5类统计变量(相关系数、标准均方差、空间分布、偏差、平均误差)进行分析,认为造成以上结果的原因主要有以下几个方面。

1) 关心区域的网格分辨存在差异,在进行结果分析时,不可避免地将网格分辨的相关信息考虑在内,而大尺度区域网格分辨最低,在进行结果分析时,其结果能代表1个网格的值,与观测结果仅代表1个较小范围的值存在较大差异。

2) 观测结果有效数据较少,168个欧洲观测站点,每3 h进行一次观测,提供的有效观测有限,在一定程度上降低了相关系数和标准均方差的统计意义。

3) 模拟示踪粒子迁移扩散过程与烟羽的实际扩散过程存在时间上的差异,模拟过程早于或晚于烟羽实际到达目的地的时间,因而在进行模拟结果与观测结果统计分析时,未能提供在该时刻该观测站点处的有效模拟结果,造成统计量数值较低的情况。

4 结论

本文将非静力动力学气象模型和拉格朗日粒子模型耦合进行多尺度扩散,以欧洲长距离扩散实验第1次试验为案例进行大、中、小尺度气象与扩散模拟,与具有气象观测数据及浓度观测数据的站点资料进行比较分析。从不同尺度地面最大浓度分布与实际观测站点结果浓度分布的匹配性来看,地面最大过境浓度分布基本覆盖观测站点,示踪粒子扩散的总体分布情况与实际情况相符,说明扩散模拟结果有效地反应了当时的区域流场特征,该模式有效地模拟了当地的地形特征和天气过程。但模拟的浓度数值结果与实际情况的匹配程度较差,认为造成模拟结果与观测结果相关性较低的原因有以下几方面:1) 不同模拟区域网格分辨不同,对模拟结果存在影响;2) 有效观测数据有限,对统计分析结果产生影响;3) 示踪粒子到达目的地的时间超前或滞后于实际到达时间,对统计分析不利。该模式对于多尺度的扩散模拟还需进行进一步检验。

参考文献(References)

[1] Bacon D, Ahmad N N, Boybeyi Z, et al. Dynamically adapting unstructured triangular grids: A new paradigm for geophysical fluid dynamics modeling[J]. Proceedings of the India Academy of Science, 2002, 22(8): 1-18.

[2] 陈德辉, 杨学胜, 张红亮, 等. 多尺度非静力通用模式框架的设计策略[J]. 应用气象学报, 2003, 14(4): 452-461.
Chen Dehui, Yang Xuesheng, Zhang Hongliang, et al. Strategy for designing a non-hydrostatic multi-scale community model dynamic core [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2003, 14(4): 452-461.

[3] 彭新东, 李兴良. 多尺度大气数值预报的技术进展[J]. 应用气象学报, 2010, 21(2): 129-138.
Peng Xindong, Li Xingliang. Advances in the numerical method and technology[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2010, 21(2): 129-138.

[4] Ohfuchi W, Nakamura H, Yoshioka M, et al. 10-km mesh meso-scale resolving simulation of the global atmosphere on the earth simulator—preliminary outcomes of AFES (AGCM for the Earth Simulator) [J]. Journal of the Earth Simulator, 2004, 1: 5-31.

[5] 陈德辉, 薛纪善, 杨学胜, 等. GRAPES新一代全球—区域多尺度统一数值预报模式总体设计研究[J]. 科学通报, 2008, 53(20): 2396-2407.
Chen Dehui, Xue Jishan, Yang Xuesheng, et al. Overall design of GRAPES global multiscale unified numerical prediction model for new generation[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(20): 2396-2407.

[6] 张人禾, 沈学顺. 中国国家级新一代业务数值预报系统 GRAPES的发展[J]. 科学通报, 2008, 53(20): 2393-2395.
Zhang Renhe, Shen Xueshun. China's new generation of operational numerical weather prediction systems at national level development of the GRAPES[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(20): 2393-2395.

[7] Zhang H, Sato N, Izumi T, et al. Modified RAMS urban canopy model for heat island simulation in Chongqing, China[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2008, 47: 509-524.

[8] Cox R, Bauer B L, Smith T. A mesoscale model intercomparison[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(2): 265-283.

[9] Pielke R A, Cotton W R, Treback C J, et al. A comprehensive meteorological modeling system RAMS[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 1992, 49(1): 69-91.

[10] 古德军. 对流边界层中粒子随机扩散模式和高斯模式的比较[J]. 热带气象学报, 2000, 16(2): 164-172.
Gu Dejun. Comparison of particle Monte-carlo diffusive model and Gauss model in convective boundary layer[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2000, 16(2): 164-172.

[11] 程麟生. 中尺度大气模式发展现状和应用前景[J]. 高原气象, 1999, 18(3): 350-360.
Cheng Linsheng. Development and application prospect of mesoscale atmospheric model[J]. Plateau Meteorology, 1999, 18(3): 350-360.

[12] Mellor G L, Yamada T. A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1974, 31(7): 1791-1806.

[13] Mellor G L, Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems[J]. Reviews of Geophysics and Space Physics, 1982, 20(4): 851-875.

[14] Yamada T. The critical richardson number and the ratio of the eddy transport coefficients obtained from a turbulence closure model[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1975, 32(5): 926-933.

[15] Yamada T. Simulations of nocturnal drainage flows by a turbulence closure model[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1982, 40(1): 91-106.

[16] Helfand H M, Labraga J C. Design of a nonsingular level 2.5 second-order closure model for the prediction of atmospheric turbulence[J].

- Journal of the Atmospheric Sciences, 1988, 45(2): 113-132.
- [17] 李军. 大气扩散参数估算方法的适用性研究[J]. 大气科学, 1993, 17(4): 506-511.
- Li Jun. Applicability of calculating method for atmospheric dispersion parameters[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1993, 17(4): 506-511.
- [18] 雷孝恩, 张美根, 韩志伟, 等. 大气污染物数值预报基础和模式[M]. 北京: 气象出版社, 1998.
- Lei Xiaoen, Zhang Meigen, Han Zhiwei, et al. Basis and model for numerical prediction of atmospheric pollutants[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1998.

Reproduction of ETEX-1 test by multiscale diffusion model

HUANG Sha, ZHAO Duoxin, CHEN Longquan, LÜ Minghua, XU Xiangjun

China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006, China

Abstract A multi-scale model is built by means of non-hydrostatic dynamics meteorological model and Lagrange particle model. According to the model, the ECMWF forecasting data and different resolution terrain data are used for the simulation of the European Tracer Experiment (ETEX), and simulation results and the monitoring results of ETEX are analyzed to study the application of the diffusion model to multiscale simulation. The results show that the multi-scale diffusion simulation results and the observations have high spatial distribution correlations, and that the diffusion simulation results effectively reflect the characteristics of the regional flow field at that time.

Keywords multiscale; diffusion; European tracer experiment; numerical simulation

(编辑 王志敏)