

郑捷, 王自发, 朱江, 等. 2016. 非结构网格空气质量模式对东亚强沙尘暴的初步模拟研究 [J]. 气候与环境研究, 21 (6): 663–677. Zheng Jie, Wang Zifa, Zhu Jiang, et al. 2016. A preliminary simulation study of an East Asian super dust storm by unstructured mesh air quality model [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (6): 663–677, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15194.

非结构网格空气质量模式对东亚强沙尘暴的初步模拟研究

郑捷^{1,2,3} 王自发¹ 朱江³ 李杰¹ FANG F⁴ PAIN C C⁴

1 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理与大气化学国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029

4 *Applied Modelling and Computation Group, Department of Earth Science and Engineering, Imperial College London, Prince Consort Road, London, UK*

摘 要 基于中国科学院大气物理研究所自主研发的嵌套网格空气质量数值预报模式 (NAQPMS) 和英国帝国理工学院应用计算与建模小组 (AMCG) 研制的有限元流体模式 (Fluidity), 构建了非结构网格沙尘传输模式 (Fluidity-Dust), 并模拟再现了 2010 年 3 月 19~22 日东亚强沙尘暴整个暴发、演变的三维立体动态过程, 从整体上对这次沙尘事件有了全新的直观认识和了解。通过利用 FY-2D 卫星沙尘反演资料及 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 卫星反演的气溶胶光学厚度 (AOD) 资料, 可对模拟结果进行整体上对比验证; 同时, 利用中国 9 个城市站点的 PM₁₀ (空气动力学当量直径小于等于 10 μm 的颗粒物, 即可吸入颗粒物) 地面观测资料以及日本多个站点的激光雷达资料, 逐一对比分析了不同地区 PM₁₀ 的时空分布以及沙尘传输经过时的垂直分布情况; 并与 NAQPMS 模式的沙尘模拟结果进行了模式间的对比分析。对比结果均表明: 该模式具有较好的模拟能力, 能很好地模拟再现整个沙尘暴过程, 为今后进一步运用自适应网格技术以实现沙尘暴的高精度追踪模拟奠定了基础。不同模式比较是量化模拟不确定性的重要方法。以往沙尘输送模式比较研究表明: 起沙量模拟的不确定性是沙尘暴数值模拟的最大不确定来源。本文通过两个具有相同起沙方案的模式对同一沙尘事件的模拟, 发现不同的平流方案以及不同的沉降计算也会对沙尘过程模拟产生重要影响。

关键词 非结构网格 空气质量模式 Fluidity-Dust 模式 NAQPMS 模式 东亚强沙尘暴

文章编号 1006-9585 (2016) 06-0663-15

中图分类号 P402

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15194

A Preliminary Simulation Study of an East Asian Super Dust Storm by Unstructured Mesh Air Quality Model

ZHENG Jie^{1,2,3}, WANG Zifa¹, ZHU Jiang³, LI Jie¹, FANG F⁴, and PAIN C C⁴

1 *State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

3 *International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

收稿日期 2015-08-23; **网络预出版日期** 2016-04-06

作者简介 郑捷, 男, 1987 年出生, 博士研究生, 主要从事大气环境数值模拟研究。E-mail: jzheng@iue.ac.cn

通讯作者 王自发, E-mail: zifawang@mail.iap.ac.cn

资助项目 中国科学院战略性先导科技专项 XDB05030200, 国家自然科学基金项目 41305111

Funded by Chinese Academy of Sciences Strategic Priority Research Program (Grant XDB05030200), National Natural Scientific Foundation of China (Grant 41305111)

4 Applied Modelling and Computation Group, Department of Earth Science and Engineering, Imperial College London, Prince Consort Road, London, UK.

Abstract Based on the Nested Air Quality Prediction Model System (NAQPMS) developed by the Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences (IAP/CAS) and the finite element fluid model (Fluidity) designed by the Applied Modeling and Computation Group, Imperial College of London (AMCG/ICL), an unstructured mesh dust transport model (Fluidity-Dust) has been constructed and employed to simulate and reproduce the outbreak of the Asian super dust storm during 19-22 March 2010 and the evolution of the three-dimensional dynamic process involved in this super dust storm. Results of this study provided new intuitive knowledge and understanding of the dust storm event. The FY-2D satellite dust images and the MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) observations of AOD (Aerosol Optical Depth) were used to compare with the simulation results on the whole. To investigate the spatial and temporal distributions of PM₁₀ at different areas, the modeled results were compared with surface PM₁₀ observations at nine Chinese cities, while Japanese lidar measurements were used to evaluate the vertical dust profiles when the dust storm passed by the monitoring sites. Model results have also been compared with the corresponding results of NAQPMS. The comparative analysis showed that the model performed well and could realistically reproduce the evolution of the dust storm. This study laid a foundation for further application of the adaptive mesh technology in real-time tracking simulation of sandstorms in the future. The comparison of different models is an important method to quantify uncertainties in the simulations. Comparative analysis of dust-transport models indicated that the uncertainty in dust flux simulation is the largest source of uncertainty in the numerical simulation of dust storms. We applied these two models that use the same dust deflation module to simulate the same dust event. Results show that different advection schemes and different calculation of deposition have significant impacts on the simulation of the dust storm.

Keywords Unstructured mesh, Air quality model, Fluidity-Dust model, NAQPMS model, East-Asian super-duststorm

1 引言

空气质量模式,作为一种有效的数值模拟工具,在研究大气污染演变规律、空气质量预报预警及大气污染控制管理决策等方面发挥着越来越重要的作用。在北京奥运会期间,以中国科学院大气物理所自主开发的嵌套网格空气质量数值预报模式(NAQPMS)、美国环保署(EPA)的MODEL3/CMAQ模式及美国Environ公司的CAMx模式为基础,建立了空气质量集合预报系统,实现了从东亚、华北、京津冀到北京全区域的空气质量实时预报,为北京绿色奥运提供了服务保障(王自发等, 2009; 吴其重等, 2010a, 2010b)。

这些模式,为了提高对特定区域的模拟精度,都普遍采用网格嵌套技术,从最外层的粗网格开始计算,一层层逐步地嵌套到里面的细网格进行重复再计算(Miyakoda and Rosati, 1977; Zhang et al., 1986; Alapaty et al., 1998)。基于质量守恒原理,需要考虑网格间的输入(由粗到细)和反馈(由细到粗)过程,这使得在网格边界处会经常产生伪震荡(Odman and Russell, 1994; Harris and Durran, 2010),且无法有效地追踪模拟大气污染中的很多

小尺度烟羽结构(结构细长且浓度梯度大);另外,嵌套网格的设计往往是基于模拟的特殊需求,由模拟者根据主观经验进行设置的;而且对不同污染区域(如京津冀、长三角、珠三角等污染区域),需要分别构建不同的嵌套网格,各自进行嵌套模拟,这样既浪费了计算资源,又不能充分考虑重要污染区域间的相互作用和影响。为此,非结构网格模式,是一个不错的选择,能有效地解决传统嵌套网格模式带来的这些诸多问题,可根据污染源、人口、地形等分布特征在全国或者特定模拟区域构建一个统一且更为客观合理的非结构网格,不再需要嵌套,能自动地在人口、排放源密集地区加密网格,而在其他地区适当降低网格分辨率。这样,今后可在全国范围内实现对各大城市的同步模拟预报,不需要再对各大城市建立各自的嵌套网格模拟系统。

以污染排放源为例,我国污染源分布主要表现为分散的局地强排放特征(尤其是大型的工业源和电厂源)。对于嵌套模式,只要设定了各层网格的区域和水平分辨率,整个嵌套网格就被限定住了,模拟区域内的局地强排放源可能会被动地落在低分辨率的嵌套网格内,在污染排放的瞬间就会被低分辨率网格所分摊稀释;而利用非结构网格模

式, 则可根据污染源排放的分布特征锁定局地强排放位置并对其周围进行网格加密, 通过针对性地提高局部地区的分辨率能有效地提高对局地污染排放的模拟精度。Zheng et al. (2015) 利用非结构网格模式, 根据京津冀地区内各电厂点源的分布位置, 针对性地构建了三维非结构网格(可精确定位到各点源位置并在其周围加密网格), 并利用自适应网格技术对点源排放的污染物进行了动态追踪模拟。

此外, 嵌套网格模式都需要根据实际地形进行垂直坐标变换, 建立地形追随坐标后, 利用有限差分或者有限体积方法在三维结构网格下进行运算; 而非结构网格模式可根据实际地形直接构建三维非结构网格, 不需要进行坐标变换, 利用有限元方法可直接在非结构网格上进行模拟运算。由于不再受到网格水平分辨率的限制, 利用非结构四面体或六面体网格能更好地刻画逼近实际地形。因此, 相比于传统模式, 非结构网格模式在模拟大气污染问题上展示了一种全新的思路和方法, 其最大优势在于网格构建较为灵活(不受水平分辨率与垂直坐标变换的限制), 可根据实际地形或者实际模拟需求构建更为客观合理的计算网格, 且易于实现自适应变网格技术。

基于非结构网格的空气质量模式, 作为今后国内外下一代空气质量模式的发展趋势或者方向, 在模式发展研究计划中具有重要的先导意义。而目前, 非结构网格模式的应用尚处于初始阶段, 主要还是针对城市微尺度的污染输送过程进行理想化模拟研究(Pavlidis et al., 2010a, 2010b; Fang et al., 2014), 没有对实际的中—大尺度大气污染过程进行过评估分析。为了探讨研究非结构网格模式在实际应用模拟中的可行性和有效性, 本文基于有限元流体模式(Fluidity)这一开放型的非结构网格模式框架, 以 NAQPMS 模式作为空气质量模式原型, 构建了一个非结构网格沙尘传输模式(简称为 Fluidity-Dust 模式), 并以 2010 年 3 月份东亚强沙尘暴过程为例, 对该模式进行模拟验证评估。此前, 许多模式研究团队利用不同模式组合(包括 WRF-NAQPMS 模式、MM5-RAQMS 模式、RAMS-CMAQ 模式以及 MM5-ADAM2 模式等)都已对此次强沙尘暴过程进行过模拟研究(李嘉伟等, 2011; Li J W et al., 2011; Park et al., 2011, 2012; Li et al., 2012; Han et al., 2012)。由于对物理过程认识的偏差, 沙

尘数值模式仍存在多方面的不确定性, 如起沙方案、重力干沉降方案、输入资料(陆面资料、源强、气象场等)和数值近似(网格分辨率、计算方法等)(林彩燕等, 2009)。沙尘模式比较计划(DMIP)(Uno et al., 2006)的结果显示: 起沙源区的风速有很大的不确定性, 起沙量相差很大, 而模式的输送和清除过程对于中国下游地区的沙尘预报影响也比较大。由于沙尘模式主要包括起沙、输送和沉降这三个过程, 本文通过 Fluidity-Dust 和 NAQPMS 这两个模式对同一沙尘事件的模拟差异, 分析理解了模式中一些重要方案(平流方案、重力沉降方案)对模拟效果的定量影响。

2 模式介绍与设置

NAQPMS 模式是由中国科学院大气物理研究所自主研发的多物种、多尺度区域空气质量模式。该模式建立在地形追随坐标上, 包括了平流、扩散、干湿沉降等主要的物理过程模块, 气相(CBMZ)、液相(RADM2)和非均相大气化学模块以及二次有机气溶胶模块, 并纳入了污染来源与过程跟踪、敏感性分析和资料同化等技术方法。其主要特色包括: 采用双向嵌套技术, 实现了从区域尺度到城市尺度污染的同步模拟; 加入了东亚起沙机制, 可用于东亚沙尘暴的模拟预警; 纳入了化学反应新机制, 模拟化学种类从过去 34 种增加到 71 种, 化学反应由 81 个增加到 134 个(Li J et al., 2011, 2012)。目前, NAQPMS 模式主要用于沙尘、酸雨、臭氧和颗粒物污染等发生发展机理和输送沉降过程研究, 同时在业务管理方面也得到了广泛应用(Wang et al., 2001, 2002, 2006, 2014; Wu et al., 2011; Li J et al., 2008, 2011, 2012)。

英国帝国理工学院应用计算与建模小组(AMCG)研制的 Fluidity 模式是基于非结构有限元网格的开放型流体模式, 具有 Navier-Stokes 等流体动力方程组模块、完整的平流扩散方程模块以及自适应变网格模块。根据不同的研究背景和需求, 可以灵活地构建对应的数学模型以及相匹配的空间网格, 可对各种多尺度流体现象进行数值模拟研究。基于有限元或者有限体积方法, 模式能在数值模拟过程中自动地实现动态网格自适应过程, 进而能更好地去追踪模拟各种物理现象或者过程(例如锋面、台风、沙尘暴等)。目前, Fluidity 模式主要

还是应用于海洋方面的模拟研究,对大气污染的实际模拟应用还较少,主要针对城市微尺度的污染物输送过程进行理想化模拟试验(Pavlidis et al., 2010a, 2010b; Fang et al., 2014)。AMCG 研究小组可根据城市街区内实际建筑群的地形数据构建出对应的非结构网格,利用 Fluidity 模式求解 NS (Navier Stokes) 方程,模拟出实际湍流风场来驱动污染物的输送过程,并根据实时模拟的污染浓度对网格进行自适应调整。而对于中—大尺度的大气污染问题,该模式的应用尚处于探索阶段,只针对京津冀区域的实际电厂点源进行过模拟应用与探讨(Zheng et al., 2015),但没有观测资料对其结果进行评估分析。

本文以 Fluidity 模式作为一个开放型的模式框架,利用其完整的平流扩散模块作为整个动力驱动模块,将 NAQPMS 模式中的起沙机制和干、湿沉降等模块对应地加入其中,构建了一个基于有限元或者有限体积方法的非结构沙尘传输模式 (Fluidity-Dust)。该模式的平流扩散模块可采用有限体积 CV (Control Volume) 方法或者间断有限元 DG (Discontinuous Galerkin) 方法。这两个方法在平流输送的模拟过程中都能较好地维持物理属性(非负性、有界性和质量守恒等),其中 CV 方法简单易行,且稳定性较好,但该方法的计算精度较低,在模拟输送过程中平流耗散现象较为严重(尤其是在浓度梯度较大的时候);而 DG 方法计算精度较高,计算也较为复杂,会耗费更多的计算资源,而且在实际模拟应用中可能出现计算不稳定。所以,本文采用 CV 方法进行模拟研究,关于这两个方法的具体介绍请详见 Zheng et al. (2015)。对于中—大尺度的大气污染问题,模式需要根据实际地形数据构建三维非结构网格,由于其无法直接模拟中尺度气象场,这就需利用 WRF 模式来提供气象输入场。通常情况下, WRF 模式提供的气象场网格与模式的非结构网格是不匹配的,需要利用插值模块将气象场数据插值到对应三维非结构网格中(Zheng et al., 2015)。

作为对比的参考模式, NAQPMS 设定的模拟区域覆盖整个东亚,水平格点分辨率为 80 km,网格数为 97×77 (纬向 $\times$ 经向),在垂直方向上有 20 层,其中最下面 10 层位于距地面 3 km 的范围内,层顶高度为海拔 20 km。沙尘气溶胶在 $0.43 \sim 10 \mu\text{m}$ 范围内分为 4 档 ($0.43 \sim 1 \mu\text{m}$ 、 $1 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 、 $2.5 \sim 5 \mu\text{m}$

和 $5 \sim 10 \mu\text{m}$),具体的起沙机制请详见 Wang et al. (2000) 和 Li et al. (2012)。模式模拟的时间段选为 2010 年 3 月 15~24 日,时间步长为 5 min,其中前 3 天作为模式预积分。

为了更好地对 Fluidity-Dust 模式的模拟性能进行评估,本文根据 NAQPMS 模式设定的网格节点分布特征构建了与之完全匹配的三维非结构网格:首先根据 NAQPMS 设定的水平网格构建对应的 97×77 二维三角网格(水平分辨率为 80 km),然后根据地形数据及 NAQPMS 设定的垂直地形追随坐标参数 σ ,将二维基准网格从层顶 20 km 处逐层依次扩展到最底层,再由模式自动生成对应三维非结构四面体网格。这样就可直接将 WRF 输入到 NAQPMS 的输入数据(陆面资料、源强、气象场等)直接输入到 Fluidity-Dust 对应的三维非结构网格中,以消除气象输入数据对模式对比结果所产生的不确定性。本文作为初步的探讨研究,并没有充分运用 Fluidity 的自适应网格技术,只是对非结构网格模式的实际模拟能力进行了检验。而 Fluidity 模式的最大优势就在于其先进的自适应网格技术,其原理简单来说就是能根据模拟变量或研究变量的 Hessian 矩阵,记录该变量在每个网格节点上的梯度大小和方向,并以此为依据对网格进行优化调整,具体原理请详见 Zheng et al. (2015)。在今后,我们将充分利用其这一优势,根据东亚地形以及沙尘源区的分布特征来构建更为客观合理的三维非结构网格(在沙尘源区充分加密网格以更好地模拟起沙过程),同时在模拟过程中运用自适应网格技术(可根据沙尘浓度的实时分布特征动态地优化调整网格)以实现沙尘的高精度追踪模拟。在此过程中, WRF 提供的气象场网格与模式的自适应网格会不匹配,需利用其自适应网格的插值模块将气象场数据插值到对应三维非结构网格中,这些都是今后进一步研究亟待解决的问题。

3 模式验证与对比分析

3.1 模拟结果

为了展示 Fluidity-Dust 模式模拟的整体效果及其三维可视化优势,图 1 给出了模拟得到的 2010 年 3 月 19~22 日东亚强沙尘暴整个暴发、演变的三维立体动态过程。高空急流中心东移经过蒙古国与内蒙古中西部的沙尘源区,通过动量下传造成的

近地面大风是此次强沙尘暴爆发的主要原因。在 19 日 06:00 (协调世界时, 下同) 时, 蒙古国与内蒙古的中西部地区有明显的起沙过程, 之后沙尘暴快速地东移南压横扫整个西北东部以及华北地区; 到了 20 日, 沙尘暴在偏南气流的带动下, 继续向南影响我国黄淮南部、江汉、江淮等地区, 而对应的高空沙粒在高空急流作用下早已传输到下游地区; 在 21 日 06:00, 蒙古国的中西部地区将会出现第二次较弱的起沙过程, 并将再次影响我国西北、华北地区, 而此前的第一次沙尘暴过程已扫过韩国、日本, 将继续影响我国江汉、汉中及东南沿海地区; 到了 22 日, 由于高空急流中心移出沙尘源区并东移入海, 我国大部分地区所受到的沙尘影响将逐步减弱, 而在日本高空则会有沙尘传输经过, 会出现不同程度高空沉降性沙尘天气。在此期间, 南疆盆地也时有沙尘暴发生, 不过由于地形的阻挡作用其影响范围不大 (王汝佛等, 2014)。

3.2 观测资料与模式间的对比验证

3.2.1 与卫星资料的整体对比

气象卫星是监测沙尘暴的一个非常有效的工具, 能从整体上有效地追踪监测沙尘暴的整个暴发、输送演变过程。国家卫星气象中心 (NSMC) 为 FY-2 系列卫星发展了一套应用于地球同步成像仪的微尘反演算法 (DRAGI), 每天都实时公布 01:30 至 09:30 的 FY-2D 静止卫星沙尘监测产品 (具体详见 <http://satellite.cma.gov.cn/PortalSite/Data/DataView.aspx>[2015-01-20])。图 2 给出了 19 日 06:00 的 FY-2D 卫星资料与 Fluidity-Dust 和 NAQPMS 模式模拟结果的对比情况: 模式模拟的沙尘强度中心基本上与卫星反演的沙尘信息相对应, 其中 NAQPMS 模拟得到的沙尘中心强度要比 Fluidity-Dust 的更强一些, 尤其是在蒙古国中南部与我国内蒙古相交的地方较为明显 (图 2c 中黑圈所标位置)。这也直接导致了, 在后面 PM₁₀ (空气动力学当量直径小于等于 10 μm 的颗粒物, 即可吸入颗粒物) 浓度与站点观测资料对比时, 北京周边地区 NAQPMS 模拟的 PM₁₀ 浓度偏高而 Fluidity-Dust 的结果却偏低。同样, 图 3 给出的是 20 日的对比情况: 整体分布情况基本上能与卫星资料相对应, 只不过模式模拟的沙尘影响范围和强度中心位置都略有不同, 相比而言 Fluidity-Dust 的模拟效果要略好一些。到了 21 日, 由于受到高空大片云层的干扰阻挡, 只能反演出部分沙尘信号, 没

法较好地反映出沙尘的整体分布情况; 但在蒙古国中西部地区反演得到的第二次起沙信号, 能很好地与模拟结果相对应, 其中 Fluidity-Dust 的起沙中心强度还是偏弱些 (见图 4)。

利用 MODIS 卫星反演的气溶胶光学厚度 (AOD) 资料可从整体上进一步对比验证 ([http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance_id=MODIS_DAILY_L3\[2015-01-20\]](http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance_id=MODIS_DAILY_L3[2015-01-20]))。如图 5 所示, 从模式间的对比来看, 在沙尘暴整个起沙和传播过程中, 模式模拟的 AOD 分布情况基本保持一致。在 19 日, 由于卫星资料的缺省, 没能反映出此次起沙过程, 这主要是由于卫星轨道间覆盖缺失以及高空云层阻挡所致; 到了 20 日, 虽然还是存在资料缺省的问题, 但能明显看出沙尘暴已经传播到我国江汉、江淮、黄海等地区, 而模式也都较好地反映出了这部分观测信息; 到了 21 日, 卫星资料相对齐全能较好地反映出 AOD 的整体分布特征, 与模拟结果整体上保持一致, 而 Fluidity-Dust 模拟效果要略好一些。此前, Han (2012) 利用类似 MODIS 卫星反演资料与 CMAQ 模拟结果也进行了对比分析, 可作为进一步的对比参考。

从图 5 与图 2、图 3、图 4 的整体对比来看, AOD 的模拟结果与表层 PM₁₀ 的对比结果是相对应的。两个模式在模拟结果上存在两个显著差异: (1) 在起沙阶段, Fluidity-Dust 模拟的沙尘中心浓度要低于 NAQPMS 的结果; (2) 在沙尘的后续输送过程中, Fluidity-Dust 模拟的沙尘浓度比 NAQPMS 的要强且影响范围也更广。导致这两个看似矛盾差异的主要原因是两个模式采用的平流方案和重力沉降机制在实现过程中存在显著差异。对于平流方案, NAQPMS 模式采用的是高精度正定质量守恒差分格式 (Walcek and Aleksic, 1998), 而 Fluidity-Dust 模式采用的是 CV 方法 (Zheng et al., 2015), 该方法的计算精度较低, 因此在平流输送的模拟过程中其耗散会更为明显。对于重力沉降机制, 两个模式都有各自独立的重力沉降模块, 虽然两个模式对各档沙尘气溶胶分别设置了相同的重力沉降速度, 但 NAQPMS 基于之前的模拟经验已对重力沉降过程做了相应的参数化设置 (林彩燕等, 2009), 这使得其实际的重力沉降效果要明显增强 (增加了 1 倍多), 因此 NAQPMS 模式的重力清除作用更强, 起沙后的沙尘在输送过程中会更快沉降到地面, 并通过干沉降机制得到快速清除。在

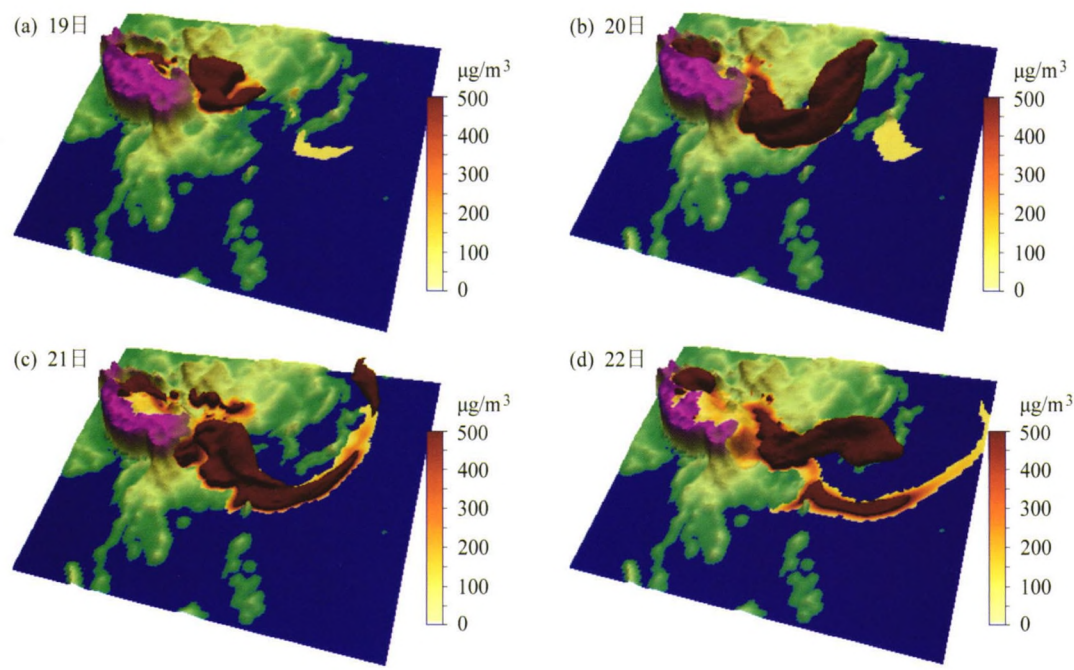


图 1 2010 年 3 月 19~22 日 06:00 近地面沙尘浓度及 $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 浓度立体等值面: (a) 3 月 19 日; (b) 3 月 20 日; (c) 3 月 21 日; (d) 3 月 22 日
Fig. 1 Modeled surface dust concentration and three-dimensional contour surface of $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ at 0600 UTC from 19 to 22 March 2010: (a) 19 March; (b) 20 March; (c) 21 March; (d) 22 March

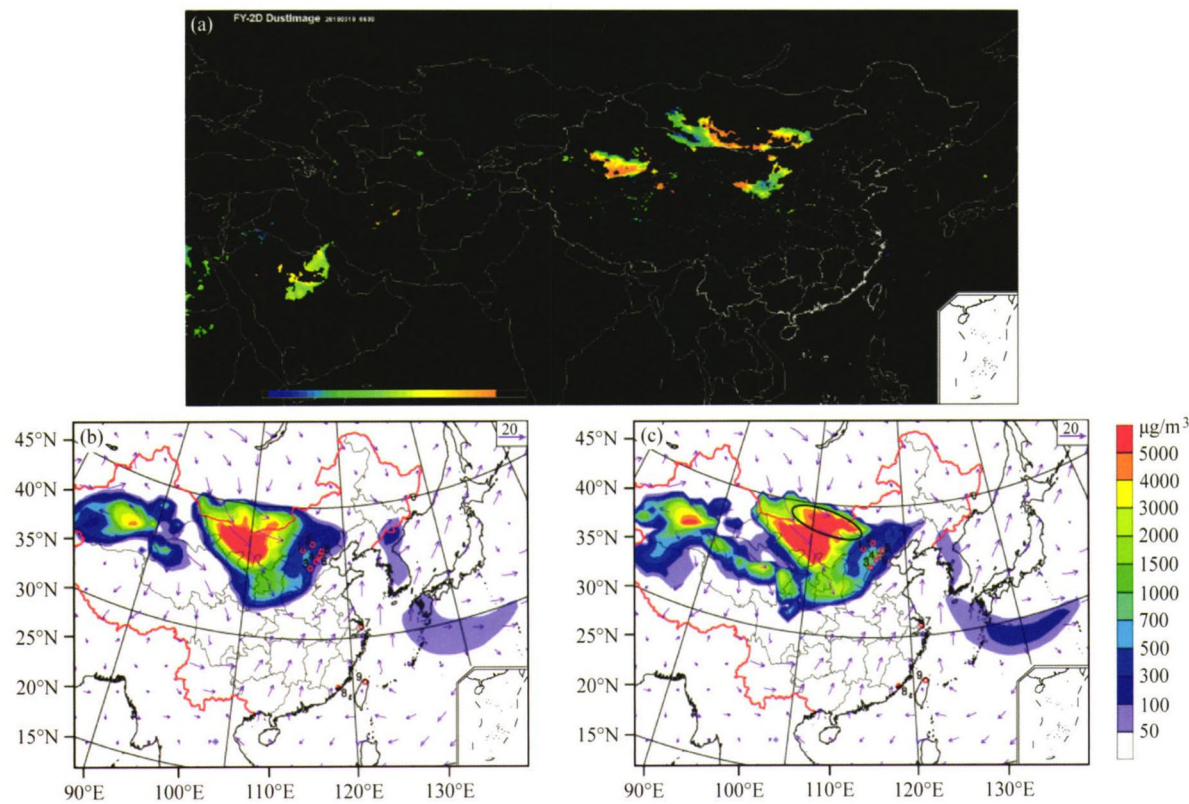


图 2 2010 年 3 月 19 日 06:00 的 (a) FY-2D 卫星沙尘监测图与 (b) Fluidity-Dust 和 (c) NAQPMS 模式模拟结果
Fig. 2 Comparisons of (a) FY-2D images of the dust storm, (b) Fluidity-Dust simulation, and (c) NAQPMS (Nested Air Quality Prediction Model System) simulation at 0600 UTC 19 March 2010

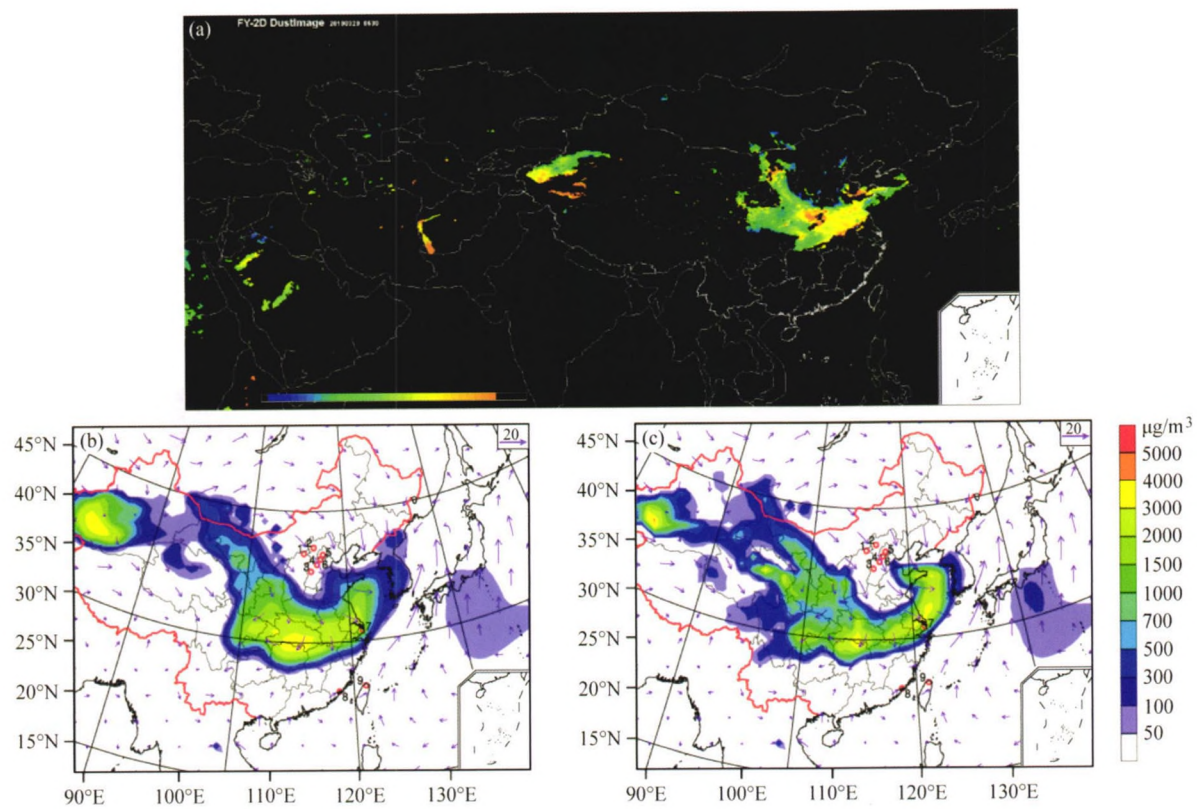


图 3 同图 2，但对应时间变为 2010 年 3 月 20 日 06:00
Fig. 3 Same as Fig. 2, but the corresponding time is 0600 UTC 20 March 2010

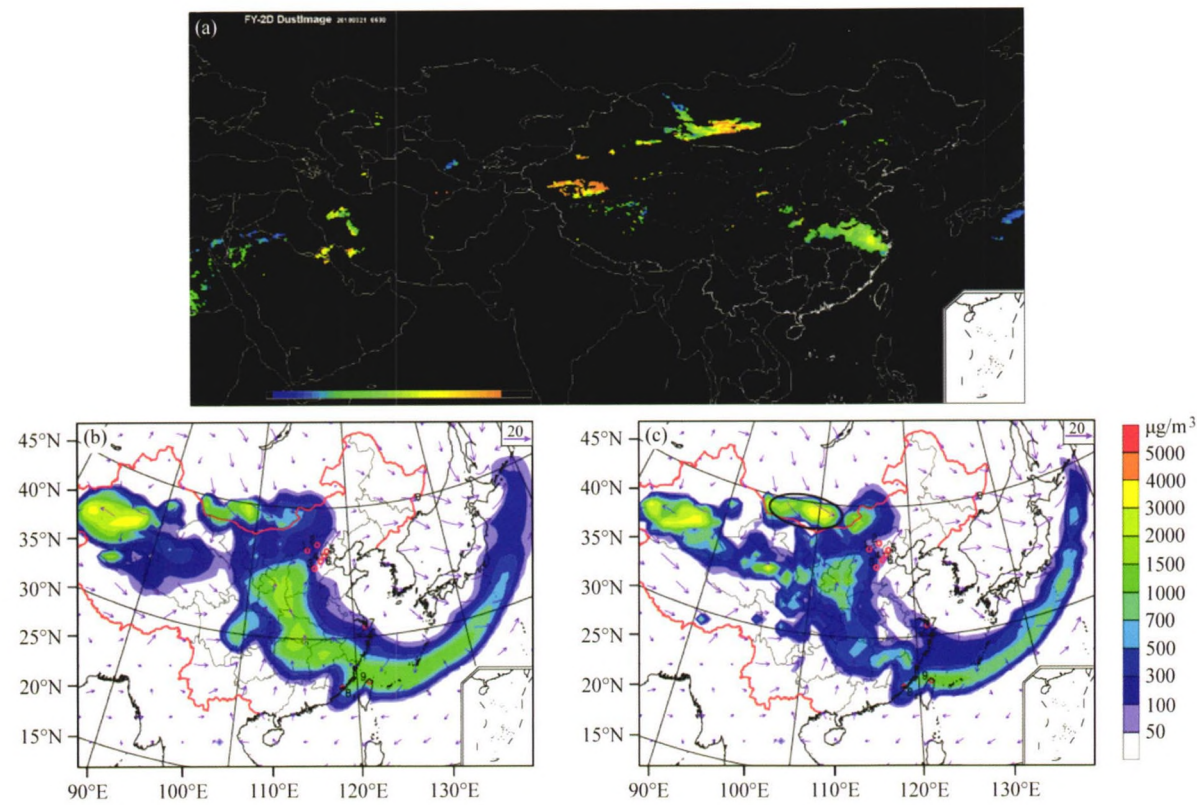


图 4 同图 2，但对应时间变为 2010 年 3 月 21 日 06:00
Fig. 4 Same as Fig. 2, but the corresponding time is 0600 UTC 21 March 2010

后面章节中,我们详细介绍了这两个方案的具体差异,并分别构建了对应的理想对比试验进行补充说明。

在起沙阶段,由于风速较大,在沙尘源地上空会瞬间起沙,并沿下游方向快速输送,而重力沉降的清除作用需要一定时间才能得以体现,所以在此阶段,模式平流方案的差异是导致模拟差异的主要原因,其中 Fluidity-Dust 的平流耗散更为严重,这使得起沙后的沙尘中心浓度会很快被耗散掉,导致其结果要比 NAQPMS 的低;而在沙尘的后续输送阶段,沙尘在经过一段时间快速输送后,其浓度梯度明显减小,且风速也在变小,所以由平流方案导致的模拟差异会变小,但由重力沉降机制导致的模拟差异会逐渐增大。由于 NAQPMS 模拟的沙尘会更快地沉降到地面得到清除,这使得在后面 20 日、21 日的模拟对比中 Fluidity-Dust 的结果反而更强。

3.2.2 与站点资料的逐一验证

通过一系列整体对比验证后,可进一步与地面站点的 PM₁₀ 观测结果进行逐一对比验证。图 6 展示了我国不同地区 PM₁₀ 观测与模拟结果的时间序列图。从定性角度看,两个模式都模拟出了与观测相对应的沙尘过程;但从定量角度看,与观测相比,两个模式模拟的均值基本上都偏低,且均方根误差也都较大,其原因是模式模拟的 PM₁₀ 只考虑沙尘气溶胶,而观测的 PM₁₀ 污染源较多(沙尘气溶胶只是其中一部分)。从模式间的整体对比来看,Fluidity-Dust 的模拟结果与观测相关性更好,且均方根误差更小,但其模拟均值比观测要低的多。对于北京周边 6 个站点,模式都较好地捕捉到了 19 日与 22 日两次较明显的沙尘信号(观测的最高浓度均超过了 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)。从第一次沙尘过程来看,NAQPMS 的结果要明显偏强,Fluidity-Dust 的结果更接近观测但要稍偏弱些;但是对于第二次沙尘过程,Fluidity-Dust 的结果就明显偏弱,NAQPMS 的结果则与观测更为接近。由于 Fluidity-Dust 的平流耗散更为严重,起沙后的沙尘浓度会很快被耗散掉,所以在这两次沙尘过程的对比中,Fluidity-Dust 的模拟结果都要明显比 NAQPMS 的低。与观测相比,第一次沙尘过程 NAQPMS 的结果明显高估,其主要原因可能是模式采用的起沙机制偏强,林彩燕等(2009)指出沙尘模拟的不确定性主要来自源强的高估(尤其是对强沙尘暴过程)。此外,由于这次沙尘过程的起沙源地离观测站点很近(见图

2c),沙尘会很快输送经过这些站点,导致重力、干沉降的清除作用较弱,再加上 NAQPMS 本身的平流耗散较弱,共同造成了 NAQPMS 模拟结果明显偏强。对于第二次沙尘过程,这次的起沙源地离观测站点相对较远(见图 4c),且相比于第一次起沙过程,这次的起沙强度和风速都要小的多,这使得沙尘输送到这些站点所需的时间更长,重力、干沉降所起到的清除作用更大,而 NAQPMS 本身的重力沉降机制又偏强,从而抵消了初始时刻偏大的起沙量。所以对于第二次沙尘过程,NAQPMS 的结果与观测更接近,而 Fluidity-Dust 的结果就明显偏弱。

对于北京,两个模式的模拟结果都不好,其主要原因可能是北京本地的污染排放较强,导致其 PM₁₀ 的污染来源和形成原因更复杂(人为源导致的 PM₁₀ 比例可能较大),使得北京观测的 PM₁₀ 不能很好地反映实际沙尘气溶胶浓度。以涿州为例,虽然该站点离北京很近,但这两个站点观测的 PM₁₀ 却相差较大,北京的要明显偏大(尤其是在第二次沙尘过程)。此外,由于北京所处地形较为复杂(三面环山),而模式设定的水平分辨率较低(80 km),WRF 模式不能较好地模拟出北京周边的局地流场,这在一定程度上也会增加模拟结果的不确定性。

对于上海、厦门和台北,模式模拟得效果较好,尤其是对厦门和台北,基本上能与观测相对应,只不过模拟的浓度有点偏低,这可能与沙尘的长距离输送有关。今后通过在模式中调用自适应变网格模块,可以有效地提高对长距离输送的模拟精度。

利用日本国立环境研究所(NIES)研制的双波长偏振激光雷达资料可进一步对模式模拟的沙尘垂直结构进行对比分析(<http://www-lidar.nies.go.jp/> [2015-01-20])。该激光雷达的最大特点是可将沙尘气溶胶与一般大气气溶胶区分,利用沙尘消光系数、后向散射强度、退偏振率、双波长信号比等信息提取出沙尘信号(董旭辉等, 2007; 陈勇航等, 2009; Tatarov et al., 2012; Zhou et al., 2013)。

图 7 给出了 2010 年 3 月 18~24 日观测与模拟的沙尘消光系数垂直剖面对比。对于蒙古国的 Zamynnuud 和日本西南海岛上的 Hedo, Fluidity-Dust 的模拟结果与雷达观测整体上基本保持一致(见图 7a、7b 和 7c、7d),其中 Zamynnuud 在 19 日有较强

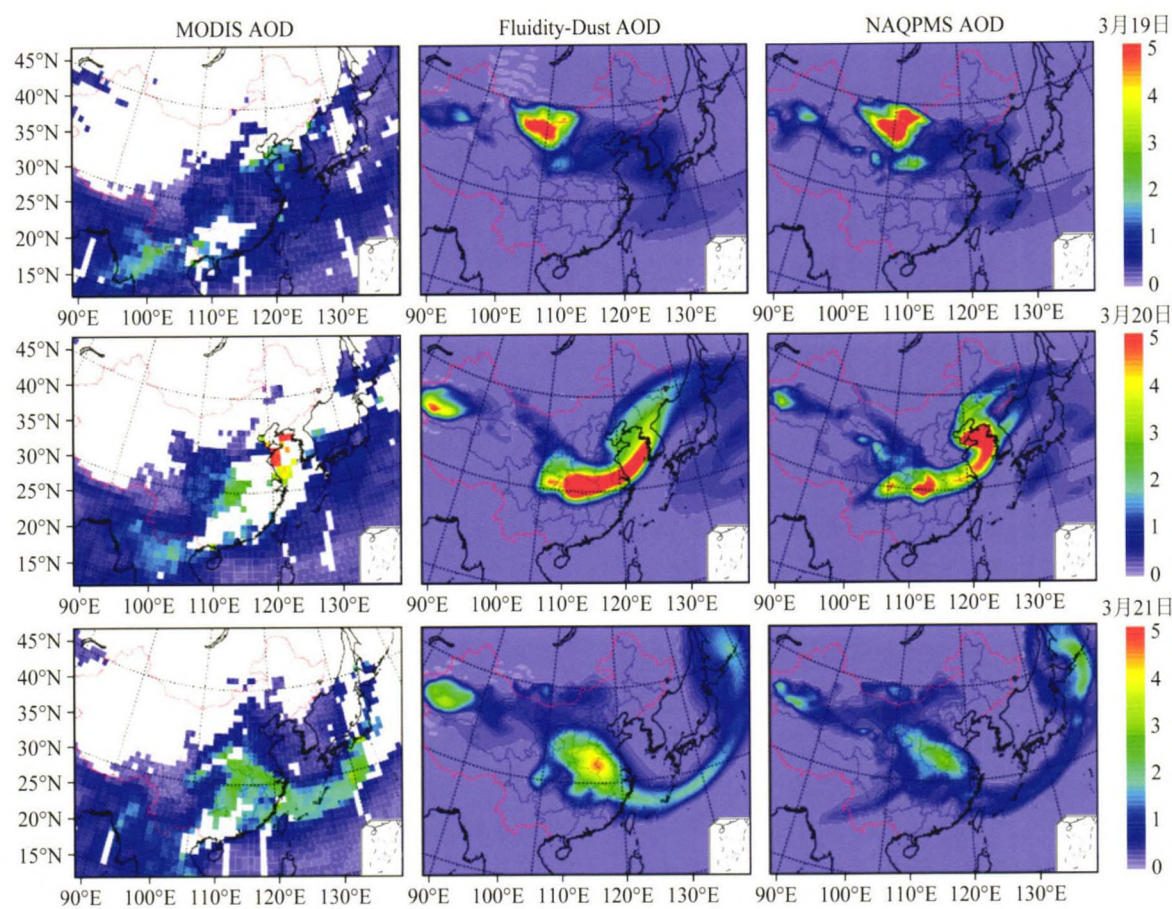


图 5 2010 年 3 月 19~21 日 MODIS 卫星反演的 (左列) 与 Fluidity-Dust (中列) 和 NAQPMS (右列) 模拟的气溶胶光学厚度 (AOD): (a、b、c) 3 月 19 日; (d、e、f) 3 月 20 日; (g、h、i) 3 月 21 日

Fig. 5 MODIS-derived (left panel) and simulated AOD (Aerosol Optical Depth) by the Fluidity-Dust (middle panel) and NAQPMS (right panel) during 19–21 March 2010: (a, b, c) 19 March; (d, e, f) 20 March; (g, h, i) 21 March

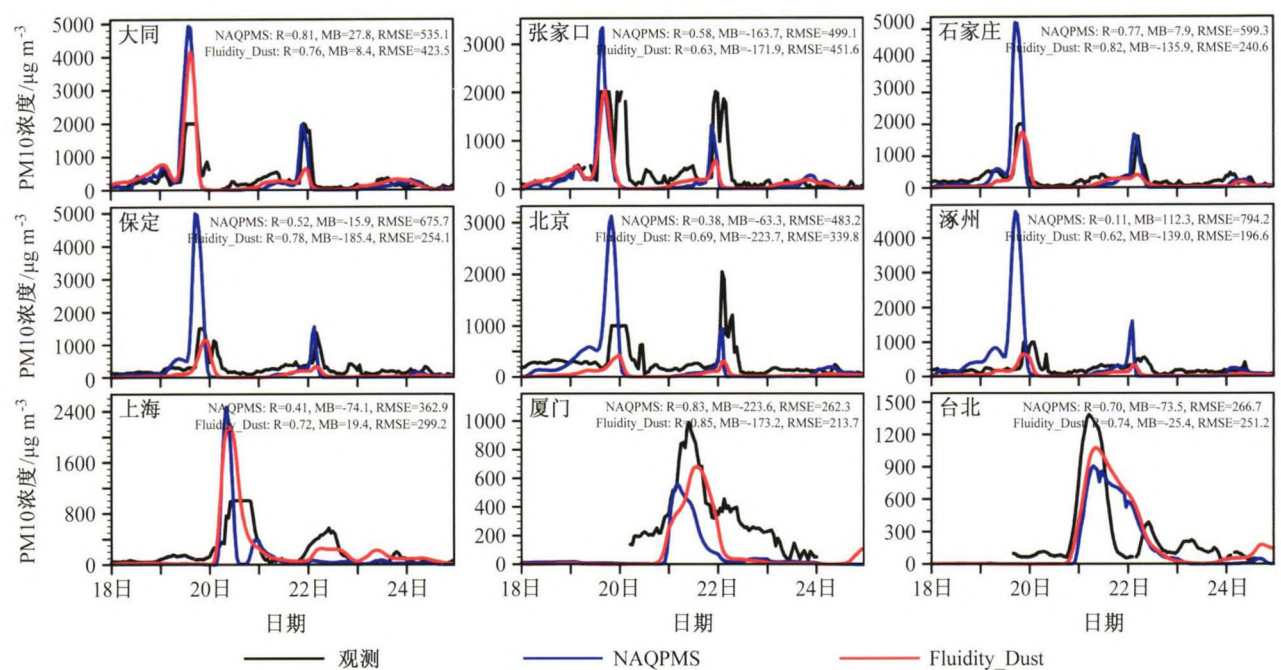


图 6 中国 9 个站点近地面观测的 PM10 (黑色) 与 Fluidity-Dust (红色)、NAQPMS (蓝色) 对应的模拟结果

Fig. 6 Observed ground-level PM10 concentrations (black) and simulated results by Fluidity-Dust (red) and NAQPMS (blue) at nine stations in China

的地面扬尘传输经过,观测到的垂直高度在 2 km 以内而模式结果却可以达到 4 km。对于日本的 Fukue 和 Matsue 站点,模式捕捉到了 19 日高空输送经过的浮尘信号和 20 日地面横扫过来的扬尘信号,只不过沙尘信号的强度及垂直范围与观测略有差别。由于 22 日以后观测资料严重缺失,模式模拟出的 22 日高空沙尘信号无法得到佐证,而这一高空沙尘信号也将直接导致日本各站点在 23 日出现不同程度高空沉降性沙尘天气。日本的 Nagasaki、Osaka 和 Chiba 等其他附近站点也都有类似情况(图略)。

为此,图 8 给出了后向散射强度、退偏振率、双波长信号比等观测信息在 Fukue 和 Matsue 站点的垂直—时间剖面图。其中,退偏振率就是 532 nm 散射光的垂直组分与平行组分之比,反映的是被测颗粒的不规则程度;而双波长信号比是 1064 nm 的后向散射强度与 532 nm 总后向散射强度之比,能够识别颗粒的大小(颗粒越大,该值就越大)。通常,大气污染物气溶胶的退偏振率较小(<10%)而沙尘的却较大(>10%),是检测沙尘信息的一个很好指标;另外,双波长信号比大于 0.4 也作为沙尘的一个判断指标,具体请详见(董旭辉等,2007)。因此,利用以上这些综合的判断标准,可以大致上判定图 8b、8e 中所画圈圈位置很有可能代表的就是对应的沙尘信号,而这些信号与图 7f、7h 中模式模拟结果基本保持一致。

3.2.3 平流方案和重力沉降机制的对比试验

由于本文中两个模式的网格是完全相匹配的,可以消除气象输入场对模式对比结果所产生的不确定性,而 Fluidity-Dust 模式的起沙机制以及地面干沉降机制都是参照 NAQPMS 的进行设置的,因此两个模式在各时刻模拟得到的起沙量应该也是一致的。所以,两个模式的模拟差异主要来自平流输送和重力沉降过程,下面我们分别从这两个角度进行介绍和讨论:

针对平流输送过程,一般考虑如下的平流方程: $\partial c / \partial t + \nabla \cdot (Vc) = 0$, 其中, $V = (u, v, w)$ 。对于 NAQPMS 模式,平流输送采用高精度正定质量守恒差分格式(Walcek and Aleksic, 1998)。下面简要介绍该方法,以一维为例,用混合比 $Q (=c/\rho)$ 代替污染浓度进行描述: $\partial(\rho Q) / \partial t = -\partial(u\rho Q) / \partial x$, 其中, ρ 为空气密度。利用向前时间差分格式,对下一时刻 $t + \Delta t$ 的混合比 Q 进行初始估计:

$$Q_i^{\text{guess}} = \frac{Q_i^t \rho_i - \frac{(\Delta t u \rho Q_f)_{i+1/2}}{\Delta x_i} + \frac{(\Delta t u \rho Q_f)_{i-1/2}}{\Delta x_i}}{\rho_i - [(\rho u)_{i+1/2} - (\rho u)_{i-1/2}] \Delta t / \Delta x_i}, \quad (1)$$

其中, Q_f 为网格单元边界的输送通量:

$$(Q_f)_{i+1/2} = \begin{cases} Q_i + \frac{(Q_{i+1} - Q_{i-1})(1-C)}{4} \alpha, & u_{i+1/2} \geq 0 \\ Q_{i+1} + \frac{(Q_i - Q_{i+2})(1-C)}{4} \alpha, & u_{i+1/2} < 0 \end{cases} \quad (2)$$

这里, C 为局地 Courant 数 ($C = |u_{i+1/2}| \Delta t / \Delta x_i$), α 为坡度因子,当 $\alpha=1$ 时,该方案就是 Bott (1989) 方案。通过判断当前 Q_i 是否为局地极值,对 α 进行对应设置,可使得整体的数值扩散最小。最后,对 Q_i^{guess} 进行单调性限制,得到

$$Q_i^{t+\Delta t} = \max[\min(Q_{\max}^{t+\Delta t}, Q_i^{\text{guess}}), Q_{\min}^{t+\Delta t}]. \quad (3)$$

对于该平流方案的具体介绍,请详见 Walcek and Aleksic (1998) 和 Walcek (2000)。

对于 Fluidity 模式,其平流输送采用的是基于非结构网格的 CV (Control Volume) 方法,其计算精度较低。该方法在三维非结构网格基础上以各网格节点为中心构建对应控制单元 V_i , 然后针对每个控制单元 V_i 的平流方程进行积分,得到

$$|V_i| \frac{dc_i}{dt} + \sum_j \int_{S_{ij}} (\mathbf{n} \cdot Vc) ds = 0, \quad (4)$$

其中, $c_i(t) = \int_{V_i} c(x, t) dx / |V_i|$, S_{ij} 为 V_i 与相邻单元 V_j 的相交边界, $\mathbf{n}$ 代表 V_i 各边界向外的单位向量, $|V_i|$ 代表控制单元 V_i 的体积。对于通量项 f_{ij} ($f_{ij} = \int_{S_{ij}} \mathbf{n} \cdot Vc ds$), 积分区域 S_{ij} 完全落在一开始构建的非结构网格单元内,利用该单元各结点(包括 i, j)的有限元形函数,可计算出积分区域 S_{ij} 内积分节点处的各变量值,从而积分求得对应的通量输送值。因此,可得到如下线性方程组:

$$|V_i| \frac{dc_i}{dt} + \sum_j f_{ij} = 0. \quad (5)$$

然后利用 Krylov 迭代法对其进行求解。对于该方法的具体介绍,请详见 Zheng et al. (2015)。

为了更好地对两个模式的平流方案进行对比,我们设置了如下的二维理想试验:首先,构建一个 100×100 的二维网格(水平分辨率为 80 km,与本文的对应),然后将整个区域内的风场统一设为西风,风速为 20 m/s,假设图 9a 所示的四个区域为起沙源地,在初始时刻由起沙机制得到初始沙尘浓度均为 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (后面不再考虑起沙过程,直接将

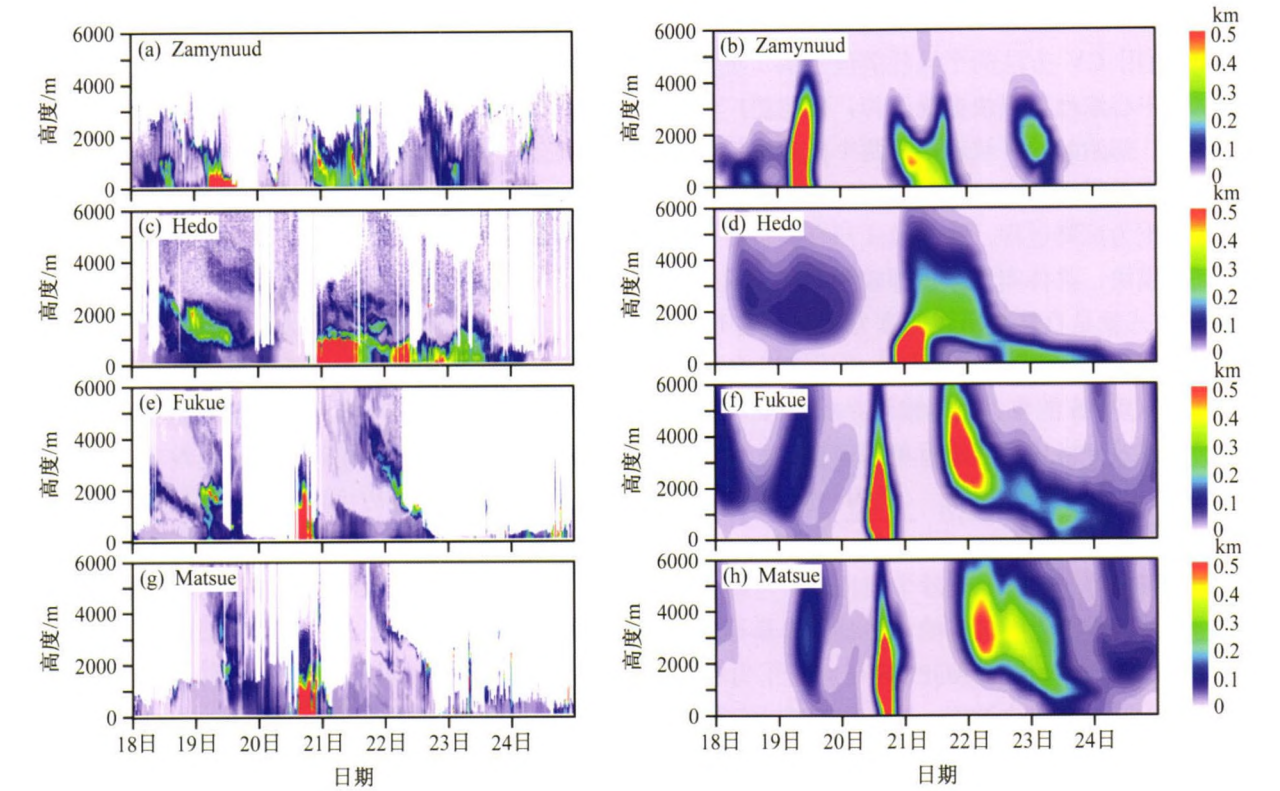


图 7 2010 年 3 月 18~24 日雷达观测（左列）与 Fluidity-Dust 模拟（右列）的沙尘消光系数高度—时间剖面：（a、b）Zamynnuud；（c、d）Hedo；（e、f）Fukue；（g、h）Matsue

Fig. 7 Time-height cross sections of dust extinction coefficients from Lidar measurements (left panel) and Fluidity-Dust simulation (right panel) during 18–24 March: (a, b) Zamynnuud; (c, d) Hedo; (e, f) Fukue; (g, h) Matsue

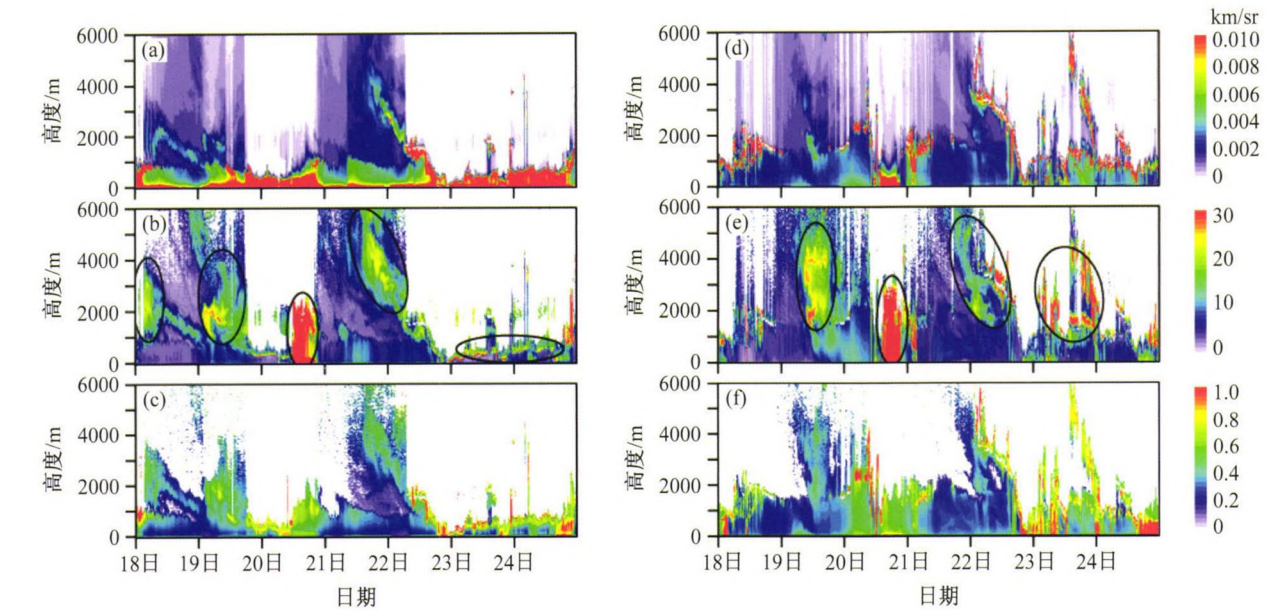


图 8 2010 年 3 月 18~24 日在 Fukue（左列）和 Matsue（右列）监测到的（a、d）532 nm 后向散射强度、（b、e）退偏振率与（c、f）双波长信号比（1064 nm 的后向散射强度与 532 nm 总后向散射强度之比）

Fig. 8 (a, d) 532-nm attenuated backscattering intensity, (b, e) depolarization ratio, and (c, f) ratio of backscattering intensity between 1064 nm and 532 nm (bottom) at Fukue (left panel) and Matsue (right panel) during 18–24 March.

起沙机制关掉), 分别用两个模式的平流方案对其输送过程进行对比模拟。从图 9 的对比结果来看, Fluidity 所用 CV 方法的平流耗散现象确实更为严重, 沙尘中心浓度会很快被耗散掉, 影响更广的范围。而且, 初始起沙区域越小, 两个模式模拟的沙尘中心浓度差异会越大。

针对重力沉降过程, 两个模式都有各自对应的重力沉降模块, 具体实现原理都较为简单。其中, Fluidity 模式就是直接将所设的重力沉降速度 V_g 加入到 WRF 输入的气象场中, 作为平流输送的一部分。而 NAQPMS 的重力沉降模块是相对独立的, 使用了迎风差格式对其进行单独模拟:

$$c_k^{t+\Delta t} = c_k^t + \left(\frac{V_g \Delta t}{\Delta z_{k+1}} c_{k+1}^t - \frac{V_g \Delta t}{\Delta z_k} c_k^t \right). \quad (6)$$

此前, 林彩燕等 (2009) 对沙尘模拟进行过敏感性试验, 结果表明重力干沉降的低估是沙尘模拟的不确定性来源之一, 为此 NAQPMS 已对其重力沉降机制做了相应的参数化设置, 这使得其重力沉降机制比 Fluidity 的要强。

为了更好地说明两个模式在重力沉降机制上的差异, 我们设计了如下的三维对比试验: 首先, 构建一个 5×5 的二维网格 (水平分辨率为 80 km, 与本文的对应), 以此为基准在垂直方向上设 20 层, 每层高度设为 100 m (如图 10 所示, 在垂直方向将比例放大了 100 倍), 只考虑重力沉降过程, 将整个区域的风场设为 0, 以第三档沙尘气溶胶为例, 设置其重力沉降速度为 5.34×10^{-4} m/s, 然后在 900~1800 m 高度范围内将初始浓度设为 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (如图 10a 所示), 分别用两个模式的重力沉降模块进行对比模拟。从图 10 的对比结果来看, 相比与 Fluidity 的重力沉降机制, NAQPMS 的重力沉降机制确实要明显偏强, 初始浓度会更快地沉降到底面得以清除。

总的来说, 这两个理想对比试验很好地印证了两个模式在平流方案和重力沉降方案上的差异: Fluidity 的平流耗散更强, 而 NAQPMS 的重力沉降更强。由于沙尘模式主要包括起沙、输送和沉降这三个过程, 本文通过 Fluidity-Dust 和 NAQPMS 这两个模式对同一沙尘事件的对比模拟和分析, 可以帮助我们更好地理解这两个模式的这三个过程对模拟效果的定量影响, 以便今后对各模块进行相应的优化调整。

对于 NAQPMS 模式, 起沙机制还是偏强 (尤

其是对强沙尘暴过程), 由于其平流输送计算精度较高 (耗散不明显), 所以需要加强重力沉降的清除作用, 以抵消起沙量过大的偏差。因此, NAQPMS 模式对沙尘模拟的不确定性主要来源于起沙机制的高估, 这与林彩燕等 (2009) 的结论是一致的, 今后应该考虑降低源强, 从而将起沙量降下来, 在此基础上可以考虑降低沉降清除作用, 以更好地对我国下游地区进行模拟预报。而对于 Fluidity-Dust 模式, 由于其平流耗散较为严重, 正好可以将高估的起沙量给耗散掉, 而其重力沉降作用又偏低, 使得沙尘在我国南方下游地区的影响范围更广、持续时间更长。因此, 该模式的不确定性主要来源于平流输送的耗散, 今后可以考虑使用更高精度的 DG 方法, 或者在 CV 方法的基础上, 利用自适应网格技术在起沙源区加密网格, 并在模拟过程中实时地对网格进行优化调整, 以更好地追踪模拟沙尘的动态过程 (Zheng et al., 2015), 在此基础上可以考虑加大沉降的清除作用。

4 结论

(1) 在 Fluidity 模式的基础上, 以 NAQPMS 模式为原型成功构建了非结构网格沙尘传输 (Fluidity-Dust) 模式, 并成功地对 2010 年 3 月 19~22 日的东亚强沙尘暴过程进行了模拟, 为今后非结构网格空气质量模式的研究发展做了初步探索性的尝试与应用。

(2) 基于非结构网格模式的三维可视化优势, 成功再现了此次强沙尘暴整个暴发、演变的三维立体动态过程, 并对这次强沙尘暴过程从整体上有了全新的认识和了解。

(3) 利用 FY-2D 静止卫星反演的沙尘监测资料和 MODIS 卫星反演的气溶胶光学厚度资料 (AOD), 从整体上对 Fluidity-Dust 模式结果进行了对比验证, 同时也与 NAQPMS 结果做了模式间的对比分析。通过模式间的整体对比, 发现存在两个显著的模拟差异: 1) 在起沙阶段, Fluidity-Dust 模拟的沙尘中心浓度要比 NAQPMS 的低; 2) 在沙尘的后续输送过程中, Fluidity-Dust 模拟的沙尘浓度比 NAQPMS 的要强且影响范围更广。Fluidity-Dust 的平流耗散更强是导致第一个差异的主要原因, 而 NAQPMS 的重力沉降更强是导致第二个差异的主要原因。

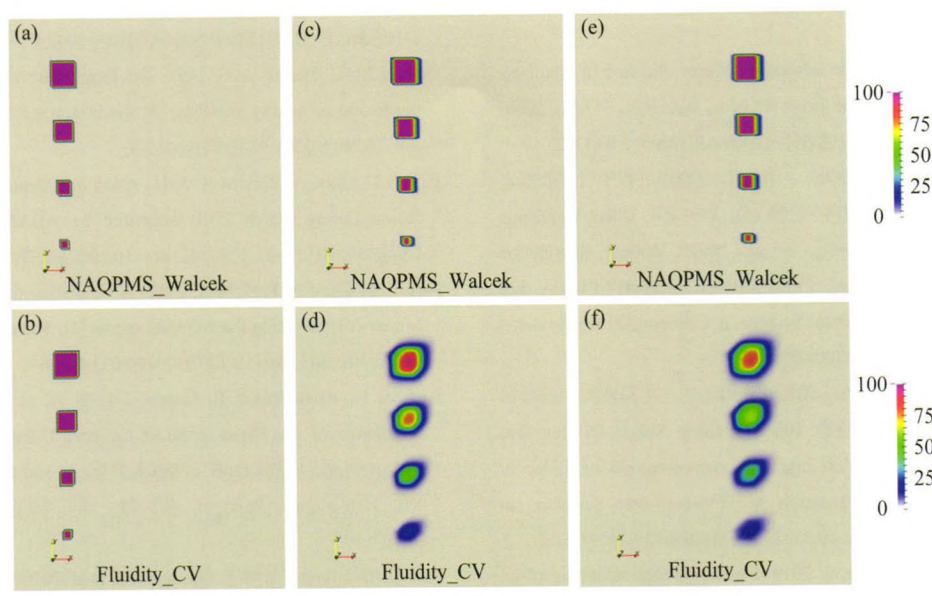


图 9 针对平流方案，两个模式模拟得到的沙尘浓度对比：(a、b) 初始时刻；(c、d) 1 天后；(e、f) 2 天后
Fig. 9 Comparison of dust concentration obtained by these two models for advection scheme: (a, b) Initial time; (c, d) One day later; (e, f) Two days later

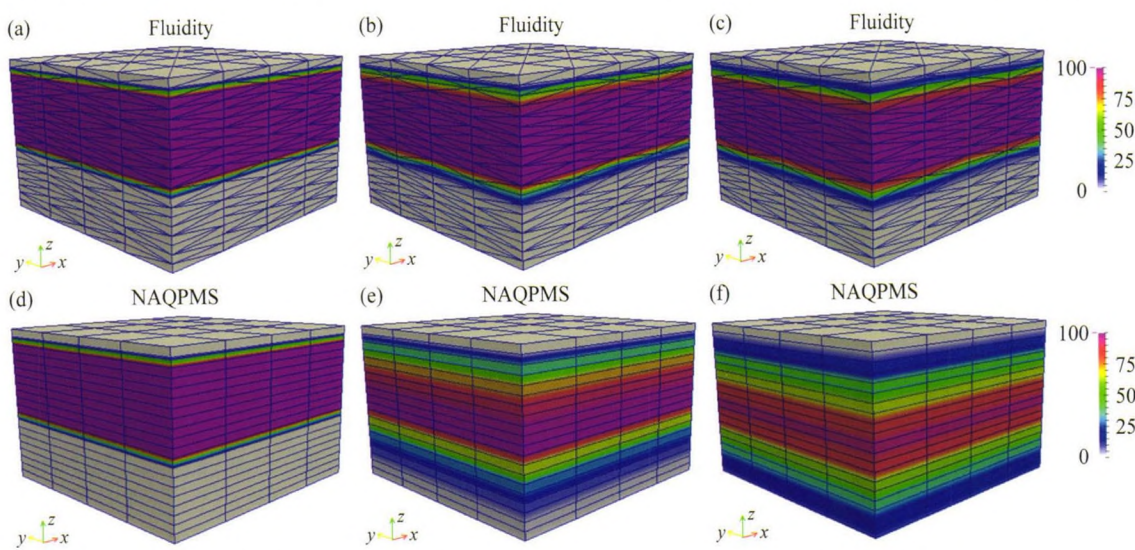


图 10 针对重力沉降机制，两个模式模拟得到的沙尘浓度对比：(a、b) 初始时刻；(c、d) 1 天后；(e、f) 2 天后
Fig. 10 Comparison of dust concentration obtained by these two models for the gravity deposition mechanism: (a, b) Initial time; (c, d) One day later; (e, f) Two days later

(4) 通过与 PM10 地面站点资料的逐一对比，模式都较好地捕捉到了传输经过各站点的沙尘信号。对于北京周边地区，Fluidity-Dust 的模拟结果要偏弱，对第一次沙尘过程模拟较好；而 NAQPMS 的结果却要偏强，但对第二次沙尘过程模拟较好。总的来看，模式的起沙机制还是偏强（尤其是对第一次强沙尘暴过程），而 Fluidity-dust 的平流耗散较为严重，正好可以将高估的起沙量给耗散掉；对于第二次沙尘过程，起沙源地相对较远（起沙强度也较弱），而 NAQPMS 重力沉降的清除作用偏强，正好抵消了起沙大的偏差。

(5) 通过对日本双波长偏振激光雷达资料的综合分析，进一步验证了 Fluidity-Dust 模式模拟得到的结论：日本多个站点在 19 日会有高空沙尘传输经过，到了 20 日会出现较严重地面扬尘天气，而到 22 日又会有高空沙尘传输经过，导致在 23 日会出现不同程度的高空沉降性沙尘天气。

参考文献 (References)

Alapaty K, Mathur R, Odman T. 1998. Intercomparison of spatial interpolation schemes for use in nested grid models [J]. Mon. Wea. Rev.,

- 126 (1): 243–249, doi: 10.1175/1520-0493(1998)126<0243:IOSISF>2.0.CO;2.
- Bott A. 1989. A positive definite advection scheme obtained by nonlinear renormalization of the advective fluxes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 117 (5): 1006–1015, doi: 10.1175/1520-0493(1989)117<1006:APDASO>2.0.CO;2.
- 陈勇航, 毛晓琴, 黄建平, 等. 2009. 一次强沙尘输送过程中气溶胶垂直分布特征研究 [J]. *中国环境科学*, 29 (5): 449–454. Chen Yonghang, Mao Xiaoqin, Huang Jianping, et al. 2009. Vertical distribution characteristics of aerosol during a long-distance transport of heavy dust pollution [J]. *China Environmental Science (in Chinese)*, 29 (5): 449–454, doi: 10.3321/j.issn:1000-6923.2009.05.001.
- 董旭辉, 祁辉, 任立军, 等. 2007. 偏振激光雷达在沙尘暴观测中的数据解析 [J]. *环境科学研究*, 20 (2): 106–111. Dong Xuhui, Qi Hui, Ren Lijun, et al. 2007. Application and data demonstration of Lidar in sandstorm observation [J]. *Research of Environmental Sciences (in Chinese)*, 20 (2): 106–111, doi: 10.3321/j.issn:1001-6929.2007.02.021.
- Fang F, Zhang T, Pavlidis D, et al. 2014. Reduced order modelling of an unstructured mesh air pollution model and application in 2D/3D urban street canyons [J]. *Atmos. Environ.*, 96: 96–106, doi: 10.1016/j.atmosenv.2014.07.021.
- Han X, Ge C, Tao J, et al. 2012. Air quality modeling for a strong dust event in East Asia in March 2010 [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 12 (4): 615–628, doi: 10.4209/aaqr.2011.11.0191.
- Harris L M, Durran D R. 2010. An idealized comparison of one-way and two-way grid nesting [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 138 (6): 2174–2187, doi: 10.1175/2010MWR3080.1.
- Li J, Wang Z F, Akimoto H, et al. 2008. Near-ground ozone source attributions and outflow in central eastern China during MTX2006 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8 (24): 7335–7351, doi:10.5194/acp-8-7335-2008.
- Li J, Wang Z F, Wang X Q, et al. 2011. Impacts of aerosols on summertime tropospheric photolysis frequencies and photochemistry over central eastern China [J]. *Atmos. Environ.*, 45 (10): 1817–1829, doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.01.016.
- Li J, Wang Z F, Zhuang G, et al. 2012. Mixing of Asian mineral dust with anthropogenic pollutants over East Asia: A model case study of a super-duststorm in March 2010 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12 (16): 7591–7607, doi: 10.5194/acp-12-7591-2012.
- 李嘉伟, 韩志伟, 张仁健. 2011. 2010 年春季东亚地区沙尘气溶胶和 PM10 的模拟研究 [J]. *中国环境科学*, 31 (10): 1600–1608. Li Jiawei, Han Zhiwei, Zhang Renjian. 2011. Simulation study on dust aerosol and PM10 in East Asia during spring 2010 [J]. *China Environmental Science (in Chinese)*, 31 (10): 1600–1608.
- Li J W, Han Z W, Zhang R J. 2011. Model study of atmospheric particulates during dust storm period in March 2010 over East Asia [J]. *Atmos. Environ.*, 45 (24): 3954–3964, doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.04.068.
- 林彩燕, 朱江, 王自发. 2009. 沙尘输送模式的不确定性分析 [J]. *大气科学*, 33 (2): 232–240. Lin Caiyan, Zhu Jiang, Wang Zifa. 2009. Uncertainty analysis of a dust-transport model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (2): 232–240, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2009.02.03.
- Miyakoda K, Rosati A. 1977. One-way nested grid models: The interface conditions and the numerical accuracy [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 105 (9): 1092–1107, doi: 10.1175/1520-0493(1977)105<1092:OWNGMT>2.0.CO;2.
- Odman M T, Russell A G. 1994. On local finite element refinements in multiscale air quality modeling [J]. *Environmental Software*, 9 (1): 61–66, doi: 10.1016/0266-9838(94)90015-9.
- Park S U, Choe A, Park M S. 2011. Asian dust depositions over the Asian region during March 2010 estimated by ADAM2 [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 105 (1–2): 129–142, doi: 10.1007/s00704-010-0380-x.
- Park S U, Choe A, Park M S. 2012. A simulation of Asian dust events in March 2010 by using the ADAM2 model [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 107 (3–4): 491–503, doi: 10.1007/s00704-011-0494-9.
- Pavlidis D, Aristodemou E, Gomes J L M A, et al. 2010a. Numerical Simulation of Air Flows in Street Canyons Using Mesh-Adaptive LES [M]//Armenio V, Geurts B, Fröhlich J. *Direct and Large-eddy Simulation VII*. Netherlands: Springer, 485–489, doi: 10.1007/978-90-481-3652-0_72.
- Pavlidis D, Gomes J L M A, Gorman G J, et al. 2010b. Novel mesh adaptive LES simulations for multi-scale atmospheric flows: Application to the urban environment [C]//30th NATO/SPS International Technical Meeting on Air Pollution Modeling and Its Applications. SPRINGER, 63–67.
- Tatarov B, Müller D, Noh Y M, et al. 2012. Record heavy mineral dust outbreaks over Korea in 2010: Two cases observed with multiwavelength aerosol/depolarization/Raman-quartz lidar [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 39 (14): L14801, doi: 10.1029/2012GL051972.
- Uno I, Wang Z F, Chiba M, et al. 2006. Dust model intercomparison (DMIP) study over Asia: Overview [J]. *J. Geophys. Res.*, 111 (D12): D12213, doi: 10.1029/2005JD006575.
- Walcek C J. 2000. Minor flux Adjustment near mixing ratio extremes for simplified yet highly accurate monotonic calculation of tracer advection [J]. *J. Geophys. Res.*, 105 (D7): 9335–9348, doi: 10.1029/1999JD901142.
- Walcek C J, Aleksic N M. 1998. A simple but accurate mass conservative, peak-preserving, mixing ratio bounded advection algorithm with FORTRAN code [J]. *Atmos. Environ.*, 32 (22): 3863–3880, doi: 10.1016/S1352-2310(98)00099-5.
- 王汝佛, 冯强, 尚可政. 2014. 2010 年春季我国一次强沙尘暴过程分析 [J]. *干旱区地理*, 37 (1): 31–44. Wang Rufo, Feng Qiang, Shang Kezheng. 2014. A severe sand-dust storm over China in the spring of 2010 [J]. *Arid Land Geography (in Chinese)*, 37 (1): 31–44.
- Wang Z F, Ueda H, Huang M Y. 2000. A deflation module for use in modeling long-range transport of yellow sand over East Asia [J]. *J. Geophys. Res.*, 105 (D22): 26947–26959, doi: 10.1029/2000JD900370.
- Wang Z F, Maeda T, Hayashi M, et al. 2001. A nested air quality prediction modeling system for urban and regional scales: Application for high-ozone episode in Taiwan [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 130 (1–4): 391–396, doi: 10.1023/A:1013833217916.
- Wang Z F, Akimoto H, Uno I. 2002. Neutralization of soil aerosol and its impact on the distribution of acid rain over East Asia: Observations and model results [J]. *J. Geophys. Res.*, 107 (D19): ACH 6-1–ACH 6-12, doi: 10.1029/2001JD001040.
- Wang Z F, Li J, Wang X Q, et al. 2006. Modeling of regional high ozone episode observed at two mountain sites (Mt. Tai and Huang) in East China [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 55 (3): 253–272, doi:

- 10.1007/s10874-006-9038-6.
- Wang Z F, Li J, Wang Z, et al. 2014. Modeling study of regional severe hazes over mid-eastern China in January 2013 and its implications on pollution prevention and control [J]. *Science China Earth Sciences*, 57 (1): 3–13, doi: 10.1007/s11430-013-4793-0.
- 王自发, 吴其重, Gbaguidi A, 等. 2009. 北京空气质量多模式集成预报系统的建立及初步应用 [J]. *南京信息工程大学学报 (自然科学版)*, 1 (1): 19–26. Wang Zifa, Wu Qizhong, Gbaguidi A, et al. 2009. Ensemble air quality multi-model forecast system for Beijing (EMS-Beijing): Model description and preliminary application [J]. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition)* (in Chinese), 1 (1): 19–26, doi: 10.3969/j.issn.1674-7070.2009.01.003.
- 吴其重, 王自发, 徐文帅, 等. 2010a. 多模式模拟评估奥运赛事期间可吸入颗粒物减排效果 [J]. *环境科学学报*, 30 (9): 1739–1748. Wu Qizhong, Wang Zifa, Xu Wenshuai, et al. 2010a. Multi-model simulation of PM₁₀ during the 2008 Beijing Olympic Games: Effectiveness of emission restrictions [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* (in Chinese), 30 (9): 1739–1748.
- 吴其重, 王自发, 李丽娜, 等. 2010b. 北京奥运会空气质量保障方案京津冀地区措施评估 [J]. *气候与环境研究*, 15 (5): 662–671. Wu Qizhong, Wang Zifa, Li Lina, et al. 2010b. Assessment on the effectiveness of the air quality assurance program in Beijing–Tianjin–Hebei area during the Beijing Olympic Games period [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 15 (5): 662–671, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2010.05.16.
- Wu Q Z, Wang Z F, Gbaguidi A, et al. 2011. A numerical study of contributions to air pollution in Beijing during care Beijing 2006 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11 (12): 5997–6011, doi: 10.5194/acp-11-5997-2011.
- Zhang D L, Chang H R, Seaman N L, et al. 1986. A two-way interactive nesting procedure with variable terrain resolution [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 114(7): 1330–1339, doi: 10.1175/1520-0493(1986)114<1330:ATWINP>2.0.CO;2.
- Zheng J, Zhu J, Wang Z F, et al. 2015. Towards a new multiscale air quality transport model using the fully unstructured anisotropic adaptive mesh technology of fluidity (version 4.1.9) [J]. *Geoscientific Model Development*, 8 (10): 3421–3440, doi: 10.5194/gmd-8-3421-2015.
- Zhou T, Huang J P, Huang Z W, et al. 2013. The depolarization-attenuated backscatter relationship for dust plumes [J]. *Optics Express*, 21 (13): 15195–15204, doi: 10.1364/OE.21.015195.