

两次典型沙尘的 WRF-Chem 数值模拟： 不同起沙方案模拟效果的评估

尹馨^{1,3}, 谭成好^{1,3}, 贾世国^{2*}, 唐明金¹

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所, 有机地球化学国家重点实验室/广东省环境资源利用与保护重点实验室/粤港澳大湾区环境污染过程与控制联合实验室, 广东 广州 510640; 2. 中山大学 大气科学学院, 广东 广州 510275; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为探寻更适用于中国沙尘过程数值模拟的起沙方案, 利用 WRF-Chem 模式分别耦合 GOCART、AFWA 和 Shao04 3 种不同起沙参数化方案对 2017 年 5 月 3–5 日和 2018 年 3 月 26–29 日发生在我国西北地区的 2 次典型沙尘过程进行数值模拟, 并综合多种地面和卫星观测资料对模拟结果进行评估。结果表明: 通过 3 种起沙方案计算得到的起沙量差距较大, 其中 GOCART 方案在 0–6 μm 粒径的起沙量最大、Shao04 方案最小。从近地面 PM₁₀ 浓度来看, 3 种方案均能反映出 2 次事件中典型城市 PM₁₀ 浓度的变化特征, Shao04 方案模拟的 PM₁₀ 浓度和观测相关性最高; 从气溶胶光学厚度(AOD)来看, 通过与 AERONET、MODIS 和 CALIPSO 的观测资料综合比较, 发现模拟结果对 AOD 存在系统性低估, GOCART 方案与观测结果最近似, 其次为 Shao04 方案, 最后为 AFWA 方案。综合考虑认为, GOCART 起沙方案相对更适用于我国西北地区的沙尘模拟。

关键词: 沙尘; WRF-Chem; 起沙参数化方案

中图分类号: X823; X831 文献标志码: A 文章编号: 0379-1726(2022)05-0528-12

DOI: 10.19700/j.0379-1726.2022.05.003

Simulating two typical dust storms with the WRF-Chem model: Sensitivity of different dust emission schemes

YIN Xin^{1,3}, TAN Chenghao^{1,3}, JIA Shiguo^{2*}, TANG Mingjin¹

(1. *State Key Laboratory of Organic Geochemistry / Guangdong Key Laboratory of Environmental Protection and Resources Utilization / Guangdong-Hong Kong-Macao Joint Laboratory for Environment Pollution and Control, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China;* 2. *School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China;* 3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Dust emission events can cause large fluctuations in particulate matter concentrations and need to be considered to predict atmospheric events accurately. This study evaluated the impact of dust emission schemes on the performance of the WRF-Chem model by comparing the data collected from two severe dust events recorded during 3–5 May 2017 and 26–29 March 2018 over northwest China against three different simulation schemes; specifically, the WRF-Chem model coupled with the GOCART, AFWA and, Shao04 schemes. Results show that there is a significant difference between the simulated results of different dust emission schemes for both events: The GOCART scheme always presented the highest dust emission in the 0–6 μm size range while the Shao04 scheme had the lowest. While the trend of surface PM₁₀ concentration in typical cities was accurately predicted by all the dust emission schemes, the Shao04 scheme provided the best performance. Generally, the 3 dust emission schemes underestimated the aerosol optical depth (AOD) when compared with AERONET, MODIS and CALIPSO

收稿日期: 2020-11-03; 改回日期: 2020-12-11

项目资助: 国家重点研发计划(2018YFC0213901)和国家自然科学基金(42022050)联合资助。

第一作者简介: 尹馨(1996–), 女, 硕士研究生, 环境工程专业。E-mail: yinxin18@mailsucas.ac.cn

通信作者: 贾世国(1985–), 男, 副教授, 主要从事大气化学研究。E-mail: jiashg3@mail.sysu.edu.cn

data. The GOCART scheme performed best, followed by Shao04 and AFWA schemes in AOD simulations. Overall, the GOCART scheme is the best choice for dust simulation in northwest China.

Key words: dust storm; WRF-Chem; dust emission parameterization scheme

0 引言

沙尘颗粒物作为全球主要的大气气溶胶成分之一, 年排放量可达约 5000 Tg(Tegen and Fung, 1994)。沙尘天气不仅对人类健康、空气质量和气候变化产生直接作用, 还会通过散射、吸收太阳短波辐射与地面长波辐射和作为云凝结核参与成云致雨等方式直接或间接地影响地气系统的辐射收支平衡(刘晓东等, 2004; Shao et al., 2011; Sun et al., 2012; Choobari et al., 2014; Huang et al., 2014; 王训明等., 2015)。此外, 当携带有大量生物可利用关键微量元素的沙尘气溶胶被远距离输送到海洋中时(Rea et al., 1998, Shao et al., 2011), 沙尘颗粒物还会影响生物地球化学循环过程(Jickells et al., 2005; Mahowald et al., 2006; 高会旺等, 2009; Maher et al., 2010)。

鉴于沙尘循环在气候系统中发挥的重要作用, 国内外学者曾采用地基观测、卫星遥感、统计分析、数值模拟等手段对沙尘进行了系列研究(Huebert et al., 2003; Mikami et al., 2006; Huang et al., 2008; Che et al., 2015; Xia et al., 2016)。近年来, 数值模式愈发成为研究和预报沙尘天气的有力工具, 被广泛应用于研究沙尘的排放、传输、沉降及其对环境 and 气候的影响。当前数值模式可以较好地还原气象条件和沙尘基本特征, 然而不同起沙参数化方案模拟的起沙量具有显著差异, 主要原因在于不同方案对起沙过程模拟的差异大。不同的起沙参数化方案考虑的输入参数、气象和土壤参数基准不一致、计算简化方式不同, 因而不同起沙方案模拟的起沙量和沙尘浓度的时空分布等存在较大的不确定性(Huneeus et al., 2010; Sugimoto et al., 2013; 吴成来和林朝晖, 2014; Kim and Choi, 2015; Su and Fung, 2015; Flaounas et al., 2017, 康丽泰和陈思宇, 2017, 刘筱冉等, 2018, Yuan et al., 2019)。此外, 不同起沙方案在不同地区的适应性存在一定的差异。西北干旱和半干旱地区是我国沙尘天气的高发区, 也是东亚沙尘的主要来源, 沙尘颗粒物经远距离传输可对位于华北、东北和长江中下游的城市空气质量产生影响, 然而当前对中国西北干旱、半干旱区域的沙尘数值模拟研究中针对不同起沙方案的评估对比有限, 因

此探究起沙方案对于中国西北沙尘事件模拟的影响具有重要意义。

本研究选取 2017 年 5 月 3-5 日和 2018 年 3 月 26-29 日期间发生在我国西北地区的 2 次典型沙尘天气过程, 使用 WRF-Chem 模式分别耦合在该模式中最常用的 3 种起沙参数化方案 GOCART、AFWA 和 Shao04 进行数值模拟, 并综合多种地面和卫星观测资料进行对比评估。目标是探讨不同起沙方案模拟的异同, 为优化模式性能、深入理解和探究沙尘循环的大气物理化学过程提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 WRF-Chem 简介

WRF(weather research and forecasting model)模式系统是由美国气象界联合开发的新一代中尺度预报模式和同化系统, 常被用于全球的区域尺度、中小尺度数值模拟、物理参数化方案研究、实时业务天气预报、数据同化研究、区域气候模拟以及耦合空气质量模式。WRF-Chem 模式是将 WRF 与化学模块(Chemistry, 简称 Chem)实现完全在线耦合的区域大气动力-化学模式(Grell et al., 2005), 其在线同步计算物理和化学过程, 考虑了生物体排放、人类活动排放和气相化学与气溶胶化学、输送(包括平流、扩散和对流过程)、干湿沉降等过程, 能真实、同步地反映大气物理化学过程。因此, WRF-Chem 模式不仅能模拟污染过程中的风速、气温和气压等气象要素的特征, 还能模拟大气污染物的排放、传输和分布等, 是用于沙尘模拟研究的有力工具。

1.2 起沙参数化方案

1.2.1 GOCART 方案

GOCART(goddard chemistry aerosol radiation and transport)方案(Ginoux et al., 2001)是基于 10 m 风速和土壤湿度的经验公式, 该方案分 5 个粒径段计算垂直起沙通量, 分别为 0~1、1~1.8、1.8~3、3~6 和 6~10 μm , 沙尘粒子的垂直起沙通量计算公式如下:

$$G = CS_s u_{10}^2 (u_{10} - u_t), u_{10} > u_t \quad (1)$$

式中: G 为垂直起沙通量; C 为常量 $0.8 \mu\text{g}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{m}^5$; S 为风蚀指数, 代表潜在沙尘源分布受地表特征如

冰雪覆盖率和植被率等的影响; s_p 为各粒径段沙尘的质量比例, 除 0~1 μm 粒径为 0.1, 其他各粒径均为 0.25; u_{10} 为离地 10 m 的水平风速; u_t 为临界摩擦速度, 受沙尘粒径大小和土壤湿度影响。

1.2.2 AFWA 方案

AFWA (air force weather agency) 方案 (Jones et al., 2010, 2012) 是 GOCART 方案的改进方案, 简称为 AFWA 方案, 继承并发展了 Marticorena and Bergametti (MB) 公式中 (Marticorena and Bergametti, 1995) 关于跳沙轰击的起沙机制计算方法:

$$H(D_p) = C \frac{\rho_a}{g} u_*^3 \left(1 + \frac{u_{*t}}{u_*} \right) \left(1 - \frac{u_{*t}^2}{u_*^2} \right) \quad (2)$$

$$G = \sum H(D_p) d S_{rel}(D_p) \quad (3)$$

$$F_{bulk} = G \alpha \times S \quad (4)$$

$$\alpha = 10^{0.136(\text{clay})-6} \quad (5)$$

式中: $H(D_p)$ 为跃移水平沙通量; C 为可变动的经验比例常量, 本研究中值为 1; ρ_a 为空气密度; g 为重力加速度; u_* 为摩擦速度; u_{*t} 为临界摩擦速度; G 是所有粒径的总轰击量; F_{bulk} 是垂直沙尘通量; S 为风蚀指数; a 为考虑了黏粒比例的沙尘轰击率。首先根据式(2)和式(3)计算总起沙通量, 再基于脆性材料断裂理论将沙尘分类到 5 个粒径段 (0~1、1~1.8、1.8~3、3~6 和 6~10 μm , 质量比分别为 0.1074、0.1012、0.2078、0.4817 和 0.1019) (Kok, 2011), 从而可计算出各粒径的垂直起沙通量。和 GOCART 方案相比, AFWA 方案使用摩擦速度 u_* 和临界摩擦速度 u_{*t} 取代了 10 m 风速, 当土壤湿度高于干燥临界点时增大, 反之不作调整。也就是说, AFWA 方案是在 GOCART 方案的基础上对黏粒比例、风蚀指数和临界摩擦速度等主要参数进行了改进。

1.2.3 Shao04 方案

Shao04 方案 (Shao, 2004) 属于 UoC (the university of cologne) 方案中的 1 种, 该方案兼顾了跳沙轰击和轰击粒子分裂两种起沙机制, 方案计算结果与观测的一致性较好。Shao04 方案计算过程如下:

$$F(d_i, d_s) = c_y \eta_{f,i} \left[(1-\gamma) + \gamma \frac{p_f(d)}{p_m(d)} \right] g \frac{Q_{ds}}{u_*^2} (1 + \sigma_m) \quad (6)$$

$$F(d_i) = \int F(d_i, d_s) p_s(d) \delta d \quad (7)$$

$$p_s(d) = \gamma p_m(d) + (1-\gamma) p_f(d) \quad (8)$$

$$\sigma_m = 12 u_*^2 \frac{\rho_b}{p_s} \left(1 + 14 u_* \sqrt{\frac{\rho_b}{p_s}} \right) \quad (9)$$

$$G = \sum_i F(d_i) \quad (10)$$

$$d \times p(d) = \sum_{j=1}^N \frac{\omega_j}{\sqrt{2\pi}\sigma_j} \exp \left[-\frac{(\ln d - \ln D)^2}{2\sigma_j^2} \right] \quad (11)$$

式中: $F(d_i, d_s)$ 为由粒径为 d_s 的沙粒跳跃碰撞产生的粒径为 d_i 的垂直起沙通量; c_y 为比例系数; $\eta_{f,i}$ 为由土壤排放到大气中的沙粒的质量分数; σ_m 是轰击系数; γ 为与沙尘粒径分布有关的权重因子, 表示集合沙粒被释放的难易程度; Q_{ds} 为跃移水平沙尘通量; G 是所有粒径的总垂直起沙通量; ω_j 是第 j 种粒径分布的占比; σ_j 和 D 均用于第 j 种粒径的对数分布; ρ_b 是土壤容重; $p_m(d)$ 和 $p_f(d)$ 分别为粒径的最小和全分布, 二者被用于计算土壤的塑性压力 $p_s(d)$ 。

因此, Shao04 方案计算各粒径沙尘通量的准确性主要依赖于原始土壤数据和 γ 。和 AFWA 方案相似, Shao04 方案同样使用了沙暴参数化来计算垂直起沙通量, 但计算过程和粒径分布 (0~2、2~3.6、3.6~6、6~12 和 12~20 μm 5 个粒径) 和 AFWA 有所差异。在 Shao04 方案中, 首先使用式(11)将最大粒径可达 2000 μm 的粒径分为由小到大的 100 种粒径分布, 然后根据式(6)~(9)计算各粒径的垂直起沙通量。随后, 规定分类直径为 2、3.6、6、12 和 20 μm , 由此获得 0~2、2~3.6、3.6~6、6~12 和 12~20 μm 的垂直起沙通量。与 AFWA 和 GOCART 方案不同, Shao04 方案只使用风蚀指数来规定潜在的沙尘源。

1.3 数值模拟实验设计

2017 年 5 月 3~7 日, 我国内蒙古部分地区发生沙尘暴, 局地出现强沙尘暴, 西北地区、华北地区和华东多地受到沙尘天气影响。2018 年 3 月 26~29 日, 我国西北地区、华北地区、华中北部和东北多部先后出现扬沙或浮尘, 其中内蒙古锡林郭勒盟局地出现沙尘暴。这 2 次沙尘事件的特征是持续时间短、强度大、影响范围广, 属于近年来较为严重的沙尘污染事件。

本研究运用 WRF-Chem V3.8.1 模拟上述两次沙尘案例, 模式设置采用单层模拟, 范围覆盖整个中国地区, 水平分辨率为 27 km, 区域格点数为 250×170, 垂直分辨率为 38 层, 时间积分步长为 150 s。模拟时间分别为 2017 年 5 月 1~9 日和 2018 年 3 月 22~31 日。模式在化学模块方案的选择上采用耦合了 RACM (regional atmospheric chemistry mechanism) 化学反应机制的 GOCART 气溶胶方案 (Hewson et al., 2012),

同时不考虑光化学过程、生物气溶胶、海盐气溶胶、湿清除和气溶胶对辐射的反馈等机制, 主要选用的其他物理化学方案见表 1。

1.4 数据资料

研究选取的气象驱动资料为欧洲气象中心提供的每 6 h 一次、水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 ERA-Interim 再分析数据。人为源采用清华大学的多尺度排放清单数据库 MEIC(multi-resolution emission inventory for China)清单(<http://www.meicmodel.org>)。为了对模拟结果进行验证, 本研究采用了酒泉、包头、北京和青岛 4 个城市监测点的 PM_{10} 浓度监测数据验证 PM_{10} 地面浓度模拟、采用 AERONET 经过云处理和人工检查的 2.0 级数据验证站点气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)模拟, 采用搭载在 Aqua 卫星上 MODIS 提供的结合了暗像元和深蓝算法反演的 L3 级 550 nm 每日平均数据产品验证 AOD 的水平分布特征模拟, 采用 CALIPSO 的 Level-2 气溶胶廓线产品验证气溶胶的垂直分布特征模拟。

表 1 模式主要选用的参数化方案
Table 1 Physical and chemical schemes

| 物理化学过程 | 参数化方案 |
|---------|---|
| 微物理 | Lin(Lin et al., 1983; Chen and Sun, 2002) |
| 积云对流参数化 | Grell-3(Grell and Devenyi, 2002) |
| 陆面过程 | Noah(Chen et al., 2010) |
| 长波辐射 | RRTM(Kim et al., 2010) |
| 短波辐射 | Goddard(Mielikainen et al., 2012) |
| 边界层 | YSU(Hong et al., 2006) |
| 气相化学机制 | RACM |
| 气溶胶 | GOCART |
| 起沙方案 | GOCART、AFWA、Shao04 |

2 结果与分析

2.1 起沙量对比

前 48 h 为模式 spin-up, 本研究通过历史天气记录验证, 仅分析记录有沙尘天气的连续数日起沙量, 时间段分别为 2017 年 5 月 3–5 日和 2018 年 3 月 27–29 日。

由于 3 种方案均包含对 0~6 μm 粒径的模拟, 讨论该粒径范围的垂直起沙量可从同一粒径水平分析不同方案的起沙特征, 表 2 可见两次案例在 0~6 μm 和全粒径的模拟起沙量, 起沙量的计算包括了模拟区域内全部格点。对于 2017 年 5 月的沙尘案例, 3 种方案模拟的起沙量均为从 3 日到 5 日逐日减小, 但方案间每日的结果差异明显, GOCART 方案起沙量逐日降低的趋势较平缓、AFWA 方案和 Shao04 方案的起沙量从 4 日到 5 日骤降。分析起沙量结果, GOCART 方案的 0~6 μm 粒径总起沙量最大(91.64 Tg), 其次为 AFWA 方案(86.64 Tg), Shao04 方案在该粒径的总起沙量显著低于前两者(43.53 Tg)。其次, 将 GOCART 方案和 AFWA 方案的 0~10 μm 全粒径起沙量与 Shao04 方案 0~12 μm 起沙量进行对比, 结果仍为 GOCART 方案最大(121.95 Tg)、AFWA 方案次之(86.64 Tg)、Shao04 方案最小(82.19 Tg)。GOCART 方案中 0~6 μm 粒径的起沙量为全粒径的 75%、AFWA 方案为 90%, Shao04 方案 0~6 μm 粒径的起沙量为 0~12 μm 粒径的 53%、仅为 0~20 μm 全粒径的 33%, 这说明 GOCART 方案和 AFWA 方案模拟结果中 0~6 μm 粒径的更小颗粒沙尘所占比例更大。

表 2 2 次案例的模拟起沙量(Tg)

Table 2 Dust emission calculated from simulations during two dust events

| 2017 | GOCART | | AFWA | | Shao04 | | |
|----------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| | 0~6 μm | 0~10 μm | 0~6 μm | 0~10 μm | 0~6 μm | 0~12 μm | 0~20 μm |
| 5 月 3 日 | 48.24 | 63.92 | 56.03 | 62.39 | 31.89 | 60.54 | 97.04 |
| 5 月 4 日 | 31.44 | 41.88 | 23.10 | 25.72 | 9.12 | 16.60 | 25.53 |
| 5 月 5 日 | 11.96 | 16.14 | 7.51 | 8.37 | 2.53 | 5.05 | 8.72 |
| 总量 | 91.64 | 121.95 | 86.64 | 96.48 | 43.53 | 82.19 | 131.29 |
| 2018 | GOCART | | AFWA | | Shao04 | | |
| | 0~6 μm | 0~10 μm | 0~6 μm | 0~10 μm | 0~6 μm | 0~12 μm | 0~20 μm |
| 3 月 27 日 | 22.13 | 29.66 | 6.09 | 6.79 | 0.37 | 0.75 | 1.27 |
| 3 月 28 日 | 32.33 | 43.08 | 15.27 | 17.00 | 3.99 | 7.5 | 11.29 |
| 3 月 29 日 | 35.72 | 47.50 | 17.53 | 19.51 | 5.93 | 10.96 | 16.57 |
| 总量 | 90.18 | 120.24 | 38.89 | 43.30 | 10.29 | 19.21 | 29.14 |

2018年3月沙尘事件,模拟起沙量的逐日变化趋势相同,均为逐日增大,但各方案模拟的总起沙量相差较大。GOCART方案在 $0\sim 6\ \mu\text{m}$ 的起沙量模拟值最高(90.18 Tg),AFWA方案约为GOCART方案的30%~50%,Shao04方案最小,其中在27日的模拟结果甚至仅为GOCART方案的1%。GOCART方案在 $0\sim 6\ \mu\text{m}$ 的总起沙量是 $0\sim 10\ \mu\text{m}$ 全粒径总起沙量的75%;AFWA方案在 $0\sim 6\ \mu\text{m}$ 的总起沙量为38.89 Tg,为 $0\sim 10\ \mu\text{m}$ 粒径的90%;Shao04方案在 $0\sim 6\ \mu\text{m}$ 的总起沙量为10.29 Tg,是 $0\sim 12\ \mu\text{m}$ 粒径的54%、 $0\sim 20\ \mu\text{m}$ 粒径的35%。对于2018年3月案例的模拟,不论是同一粒径范围还是单个方案考虑的全粒径范围,Shao04方案的起沙量均为最小。

综合2017和2018年两次沙尘事件的模拟结果,GOCART、AFWA和Shao04方案间的差异显著,因此,有必要进行进一步分析,通过对比观测和模拟结果来探讨不同方案对我国沙尘模拟的适用性。

2.2 地面观测与模拟对比

2.2.1 城市 PM_{10} 浓度

为了更全面地评估不同起沙方案的模拟效果,

本研究选取了邻近塔克拉玛干沙漠的酒泉、邻近戈壁沙漠的包头、位于下风向的北京和沿海传输路径的青岛4个城市的 PM_{10} 观测值来与同时段的模拟结果进行对比,每日观测结果和模拟结果均进行了6 h,以便更明显地观察变化趋势。图1、2分别为典型城市站点2017年5月3~9日和3月25~31日期间模拟与观测 PM_{10} 的对比。

2017年5月3~9日期间,酒泉3日中午地面 PM_{10} 浓度陡升至 $1150\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,Shao04方案反映了这一高值特征但估值明显偏低;GOCART方案虽然可以反映高值但是出现时间向前偏移;AFWA高值不明显。此后,观测浓度在5日达到第2个峰值($400\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),模拟结果中该峰值均早于观测结果6 h,GOCART和AFWA方案的浓度值与观测相近,Shao04方案显著偏低。对于酒泉地面 PM_{10} 浓度的模拟,Shao04方案相较于观测结果的相关系数最高(0.89);3个方案对于除峰值以外的其他时段模拟表现比较相近且基本符合观测。

在包头,前12 h的模拟结果数值均显著偏高。观测峰值共出现两次,分别为 $1350\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (4日06时)

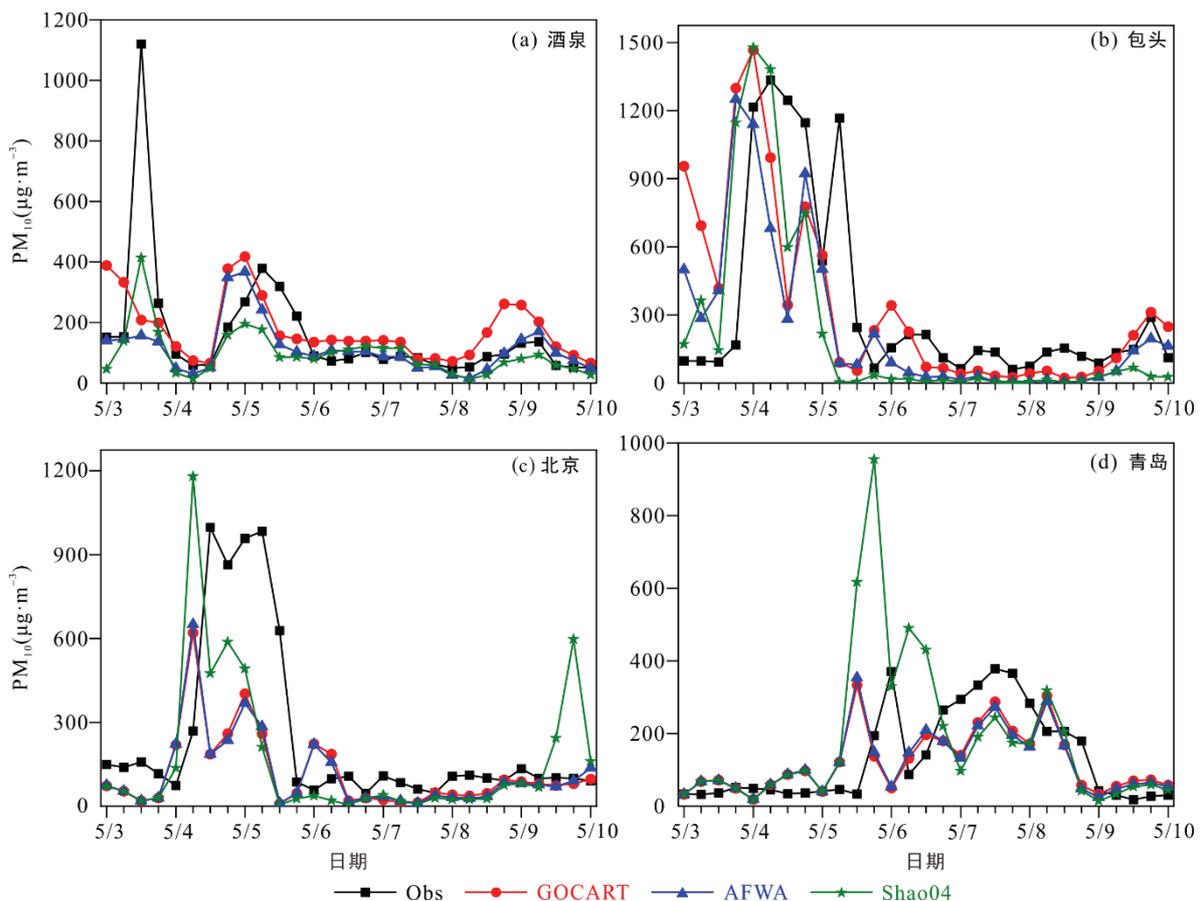


图1 典型城市站点2017年5月3~9日模拟与观测 PM_{10} 对比(Obs代表观测值,下同)

Fig.1 Simulated and observed PM_{10} concentration in typical cities from 3~9 May 2017

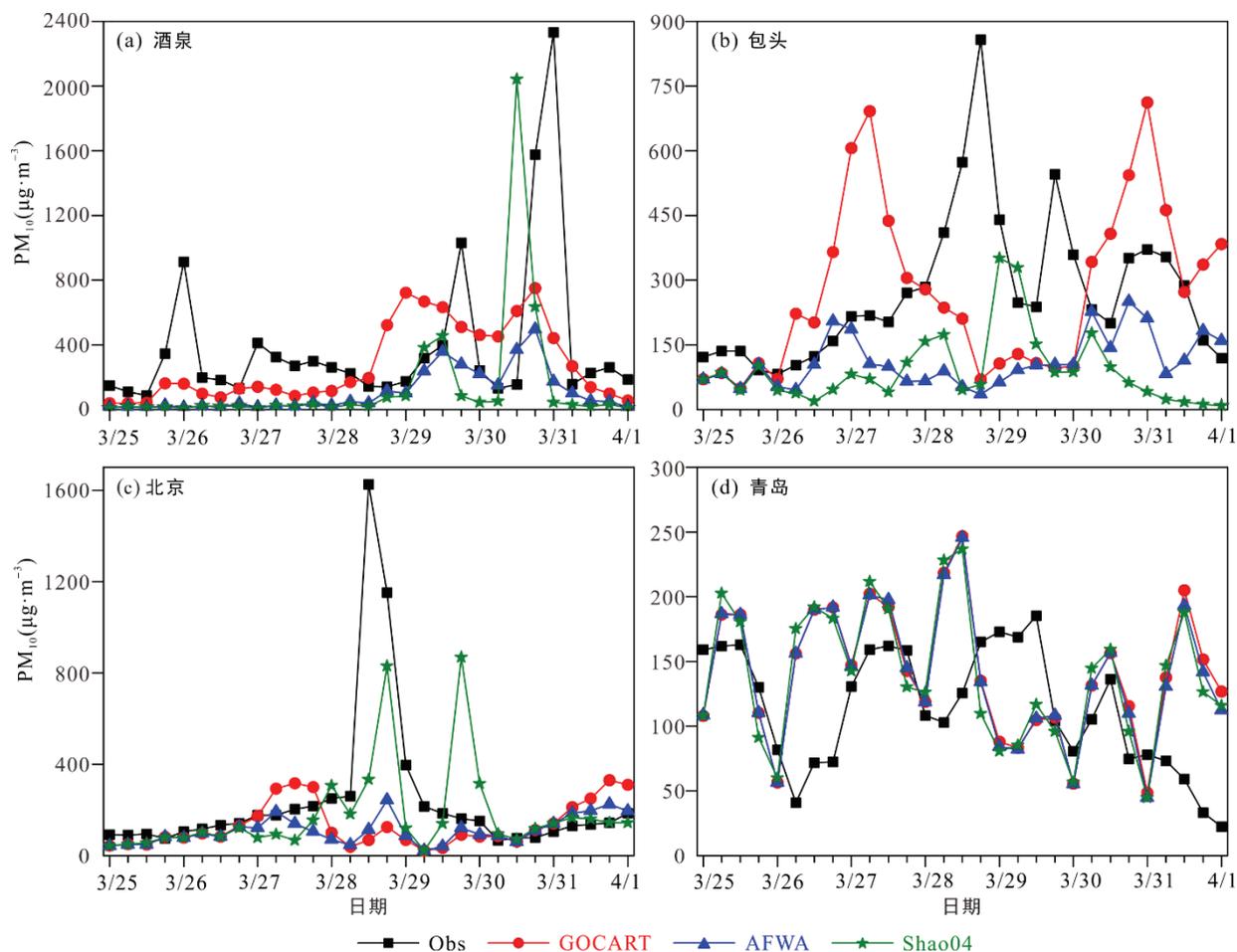


图 2 典型城市站点 2018 年 3 月 25–31 日模拟与观测 PM_{10} 对比
 Fig.2 Simulated and observed PM_{10} concentration in typical cities from 25–31 March 2018

和 $1200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (5 日 06 时), 两次峰值的间隔时间比较短, 3 个方案均模拟还原出了两个峰值, 但模拟峰值分别提前了 6 h 和 12 h。6–9 日期间, 包头的观测浓度在每天正午达到小峰值, 但模拟结果没有还原出这一特征, 模拟结果在非峰值时段偏低。整体来看, 不同起沙方案的 PM_{10} 模拟结果在酒泉和包头等近沙尘源地的差异性并不显著, 各方案均能较好地模拟出观测到的沙尘浓度变化特征, 这说明了模拟是可信的。

北京的观测浓度在 4–5 日间出现较大起伏, PM_{10} 浓度变化超过 $1000 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其余时段浓度在 $300 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下, 和包头相似。北京的观测浓度在较短时间间隔中也出现了 2 次峰值 (4 日 12 时和 5 日 06 时, 均为 $1000 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右)。GOCART 和 AFWA 方案在北京的差异性小, 二者的统计分析数据非常接近 (与观测数据的相关系数分别为 0.48、0.46), Shao04 方案对两次峰值的模拟浓度均高于 GOCART 和 AFWA 方案, 对第 1 个峰值的模拟出现一定程度的估值偏高

但更接近观测值, 模拟结果的第 2 次峰值, 3 种方案均估值偏低, 其中 Shao04 方案与观测值差值最小, 但 Shao04 方案在模拟后期出现 1 次虚高值。

青岛的观测浓度出现了两次时间间隔较长的峰值, 分别在 6 日 0 时和 7 日 12 时, PM_{10} 浓度同约为 $400 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。GOCART 和 AFWA 方案在青岛的差异性不显著, 3 个起沙方案均捕捉到了首次峰值, 其中 GOCART 方案和 AFWA 方案的模拟浓度值近似但提前 12 h 出现, Shao04 方案仅提前 6 h 但浓度上约为观测值的 2 倍, 模拟结果均没有表现出第 2 次峰值。

2018 年 3 月 25–31 日期间, 酒泉的观测浓度有 3 次显著高值出现, 分别为 900 (26 日 0 时)、 1000 (29 日 18 时) 和 $2300 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (31 日 0 时), 其余时间段浓度值在 $400 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下。模拟结果均没有捕捉到首次峰值, 28 日 12 时前模拟浓度值小于 $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。后两次峰值方案间的差异性较大: GOCART 方案分别提前 18 h、6 h 出现峰值, 且 2 次峰值浓度都在 $800 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下; AFWA 方案均提前 6 h, 2 次浓度均

低于 $500 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; Shao04 方案分别提前 6 h、12 h, 浓度分别为 $500 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $2000 \mu\cdot\text{m}^{-3}$, 该方案对峰值的模拟更接近观测值。

包头的 PM_{10} 观测浓度在 28 日 12 时前持续增大, 从起始的约 $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 至该时刻出现首次峰值约 $900 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 第 2 次峰值于 29 日 18 时出现 ($520 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 最后 1 次峰值于 31 日 0 时出现 ($375 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。GOCART 方案捕捉到了首次和末次峰值, 但模拟出的首次峰值提前了 36 h 而末次峰值的模拟值 ($700 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 比观测值高约 1.5 倍; AFWA 方案的模拟浓度值始终不超过 $300 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 对峰值的捕捉效果不佳; Shao04 方案模拟出了 3 次完整峰值, 但峰值时间均提前 (分别提前 12、18 和 18 h), 且模拟值明显偏低。综合分析酒泉和包头两地的 PM_{10} 浓度, GOCART 方案下的模拟结果整体偏高, 而 AFWA 方案和 Shao04 方案偏低, 这和起沙量模拟结果中 GOCART 方案显著高于 AFWA 和 Shao04 方案的现象一致。

北京的观测浓度呈现单峰趋势, 峰值于 28 日 12 时出现 ($1600 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 其余时段浓度值较平稳 (不超过 $400 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。3 个方案的模拟结果在 28 日 18 时均出现了升高趋势, 但浓度和观测值相差甚远, 其中 Shao04 方案在 29 日 18 时出现了和观测结果不符的峰值 ($900 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。总体来看, 模拟低估了北京的地面 PM_{10} 浓度。

青岛的 PM_{10} 观测浓度始终小于 $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 说明该次事件中青岛受沙尘影响不显著, 虽然浓度变化范围较大但是特征值不明显。起沙方案间的差异性在青岛无法得以体现, 模拟结果的浓度变化范围大于观测值, 但整体相差不大。

总的来说, 3 种方案均能反映出 2 次事件中典型城市 PM_{10} 浓度的变化特征, 但各方案对两次沙尘的模拟表现出了不同特征。对于 2017 年沙尘, 方案间的 PM_{10} 模拟结果在近沙尘源地的两个西北城市差异性并不显著, 在下风向城市 Shao04 方案存在估值偏高; 对于 2018 年沙尘, GOCART 方案对 2 个西北城市的 PM_{10} 浓度的估值偏高, 3 个方案对下风向城市的模拟差异不显著。另外, Shao04 方案的 2 次模拟结果在北京均出现 1 个沙尘后期虚高峰值。

2.2.2 AERONET 站点观测

AOD 反映了整个大气层或某特定大气层中颗粒物对太阳辐射的削弱程度。2017 年 5 月沙尘期间, Beijing-CAMS 站点 (116.3°E , 39.9°N , 106.0 m) 含 5 个 AOD 有效数据日, 4 日和 8 日数据缺失 (图 3a)。3 日的 AOD 最大 (1.6), 而模拟 AOD 值均在 0.2 以下, 模拟值在 4 日出现峰值 (Shao04 方案 0.9、GOCART 方案 0.6、AFWA 方案 0.5), 后降至较低的平稳值 (不超过 0.2), 7~9 日的增大趋势和观测相符; XiangHe 站点 (117.0°E , 39.8°N , 36.0 m), 含 5 个有效数据日, 5 日和 8 日数据缺失 (图 3b)。观测 AOD 值在 4 日最大, 为 2.2、7 日最小, 为 0.1, 基本呈单峰趋势。模拟准确还原了观测的单峰趋势, 但相较于观测结果数值显著偏低, 最大值仅为 1.0。综合 2 个 AERONET 站点结果, 模拟基本反映了 AOD 的变化趋势。

2018 年 3 月沙尘期间, Beijing-CAMS 站点含 6 个有效数据日, 28 日缺乏数据, 观测 AOD 值范围在 0.2~1.4 之间, 模拟结果在 30 日前存在普遍偏低 (模拟 AOD 值不超过 0.3), 同时模拟没有反映出此次沙尘期间站点 AOD 趋势的变化, 27 日观测 AOD 值一度

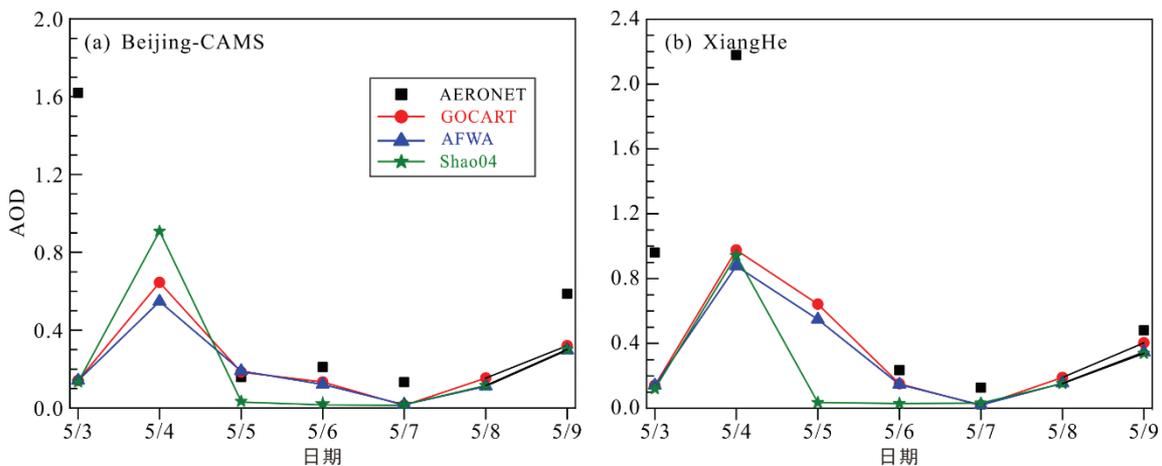


图 3 2017 年 5 月 3-9 日 AERONET 观测 AOD(550 nm 波段)与模拟对比
Fig.3 Simulated and observed AOD in AERONET sites from 3-9 May 2017

高达 1.4 但模拟未能还原这一高值; 31 日, 观测 AOD 值由 0.6 增大至 0.9, 模拟均反映了这一增大趋势(从 0.2 增大至超过 0.8)。总体来说, 对于 2018 年沙尘, 各方案间 AOD 模拟差异不明显, 对该次沙尘的 AOD 反映效果较差(图 4)。

2.3 卫星观测与模拟对比

2.3.1 MODIS 卫星观测

MODIS 卫星观测数据可反映沙尘的水平空间分布特征, 图 5 为 2017 年 5 月 4 日 MODIS 观测和 WRF-Chem 模拟的 550 nm 波段 AOD 水平分布对比

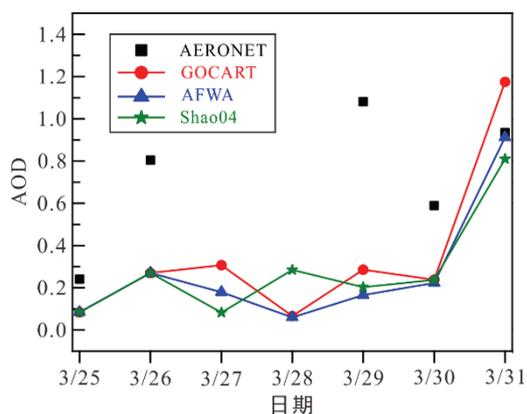


图 4 2018 年 3 月 25–31 日 AERONET 观测 AOD(550 nm 波段)与模拟对比

Fig.4 Simulated and observed AOD in AERONET site between 25–31 March 2018

比。内蒙古、华北和东北地区在 4 日受沙尘影响严重, AOD 值超过 1.0(图 5a)。对比观测和模拟的 AOD 水平分布结果, 发现 3 种起沙方案基本均反映了 AOD 水平分布特征, 但方案间有所不同。3 种方案均在华北地区出现高值区, 但 GOCART 模拟的高值中心往西南偏移, AFWA 方案高值区域面积较小, Shao04 方案模拟的高值区最接近观测, 但高值范围较观测偏小, 未模拟出甘肃、内蒙古北部的次高值区, 模拟 AOD 水平分布所反映的特征和各方案的起沙量模拟数值有较好的对应关系, 方案间起沙量的模拟差异是造成 AOD 的水平分布差异的原因之一。总体上看, 模拟结果较观测值偏低, 特别是在内蒙古, 模拟值约为 0.4, 而观测值在 1.0 以上。

图 6 为 2018 年 3 月 29 日 MODIS 观测和 WRF-Chem 模拟的 550 nm 波段 AOD 水平分布对比。29 日, 我国有 2 个明显的 AOD 高值区, 分别位于新疆的塔克拉玛干沙漠和山东半岛, 可知沙尘在起沙源地的影响仍然在持续。而前期起沙已扩散至海上, 对朝鲜半岛和日本产生了影响, 这一特征在模拟结果中均有体现。对比观测和模拟结果, GOCART 方案和 AFWA 方案均体现了塔克拉玛干沙漠的高值特征, 其中 AFWA 方案模拟 AOD 值较低, 而 Shao04 方案没有模拟出这一区域的高值。3 个方案在戈壁沙漠均有较高值出现, 但缺少观测结果无从对比。观测

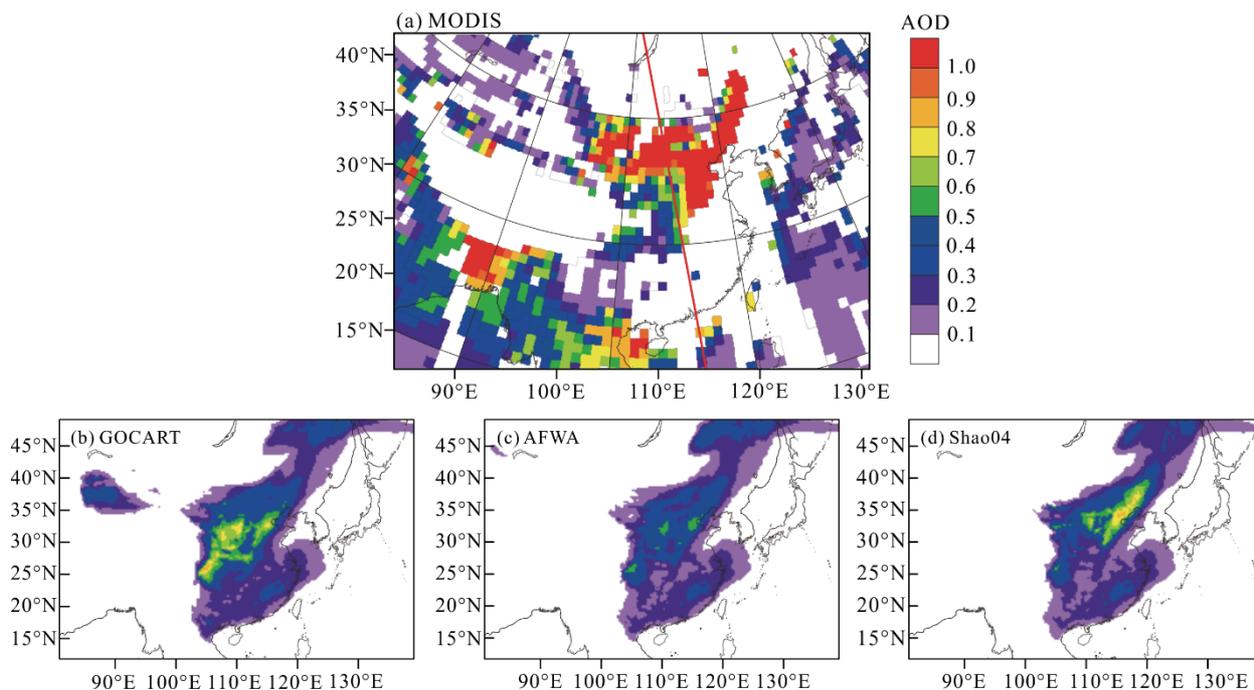


图 5 2017 年 5 月 4 日 MODIS 观测 AOD(550 nm 波段)与模拟对比(红色直线为该事件中对比的 CALIPSO 卫星轨迹)

Fig.5 Simulated and MODIS-observed AOD on 4 May 2017

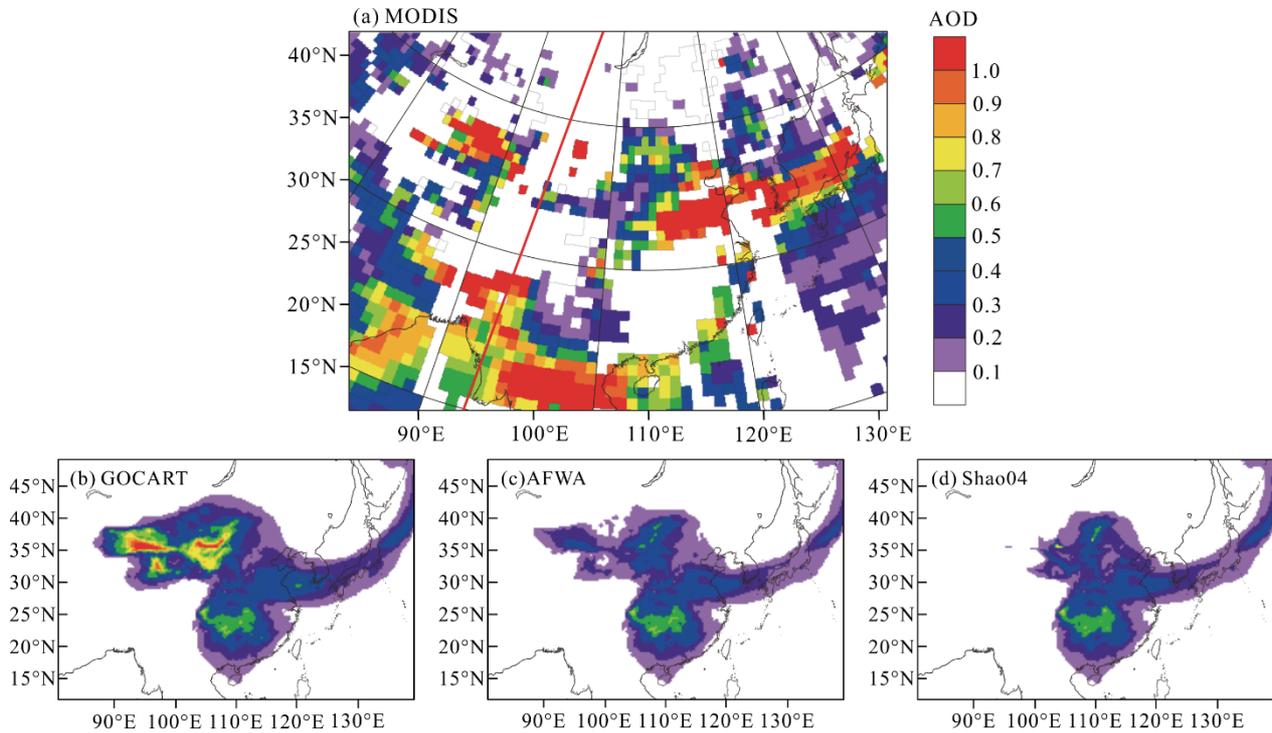


图 6 2018 年 3 月 29 日 MODIS 观测 AOD(550 nm 波段)与模拟对比(红色直线为该事件中对比的 CALIPSO 卫星轨迹)

Fig.6 Simulated and MODIS-observed AOD on 29 March 2018

结果中存在跨河南-山东半岛-朝鲜半岛的带状 AOD 高值区域(超过 1.0), 模拟结果中反映了这一特征, 但模拟值仅约 0.4, 和 2017 年结果相同, 模拟 AOD 值较观测值偏低。

2.3.2 CALIPSO 卫星观测

CALIPSO 卫星数据可提供气溶胶的垂直结构信息, 图 7a 反映了 2017 年 5 月 3 日 06:00-06:09 期间 CALIPSO 卫星观测到的 532 nm 消光系数。受模式输出步长限制, 选取与该时段最接近的 06:00 时刻模式输出结果, 不难发现模拟基本还原了气溶胶的垂直结构特征: CALIPSO 观测和 WRF-Chem 模拟的最大扩散高度均在 8.0 km 左右; 观测结果在 38°~46°N 垂直截面的消光系数出现高值区, 扩散高度最大达到约 4.5 km。模拟结果捕捉到了这一高值区, 最大扩散高度略低于观测值(4.0 km), 其中 Shao04 方案的模拟结果和观测到的垂直结构相似度最高; 模拟方案在 32~36°N 有明显的垂直混合特征, 其中 GOCART 的消光系数达到 0.3 以上, 同区域缺少观测值。

图 8 为 2018 年 3 月 28 日观测(19:33-19:45)与模拟(20:00)的气溶胶垂直结构对比。CALIPSO 观测中出现 40~43°N 的高值区, 模拟反映了这一垂直扩散特征, 但缺少地形和观测值, 限制了可对比范围。

GOCART 方案下的模拟结果和观测最为近似, 二者的相关系数最大值均大于 0.4, 扩散高度均超过 3.0 km; AFWA 方案模拟的消光系数最小、扩散高度在 2.5 km 以下; Shao04 方案的扩散趋势和 AFWA 方案相似, 但消光系数还原度高于 AFWA 方案。整体来说, GOCART 方案表现最好。

3 结 论

(1) 对于 2 次沙尘案例, 3 种起沙方案下的起沙量结果差异较大, 其中 GOCART 方案在 0~6 μm 粒径的起沙量最大、Shao04 方案最小。相较于 GOCART 方案和 AFWA 方案, Shao04 方案对 2018 年沙尘的起沙量模拟明显偏小。

(2) 3 种方案均能反映出 2 次事件中典型城市 PM₁₀ 的变化特征。对于近沙尘源地的 PM₁₀ 模拟, 各方案对 2017 年沙尘事件的模拟差异不显著, 而 GOCART 方案对 2018 年案例的模拟值明显偏高。整体来看, Shao04 方案模拟的 PM₁₀ 浓度和观测相关性最高。

(3) 通过与 AERONET、MODIS 和 CALIPSO 3 种观测资料的对比分析, 发现模拟结果对 AOD 存在系统性估值偏低, 同时, 模拟 AOD 水平分布所反映的

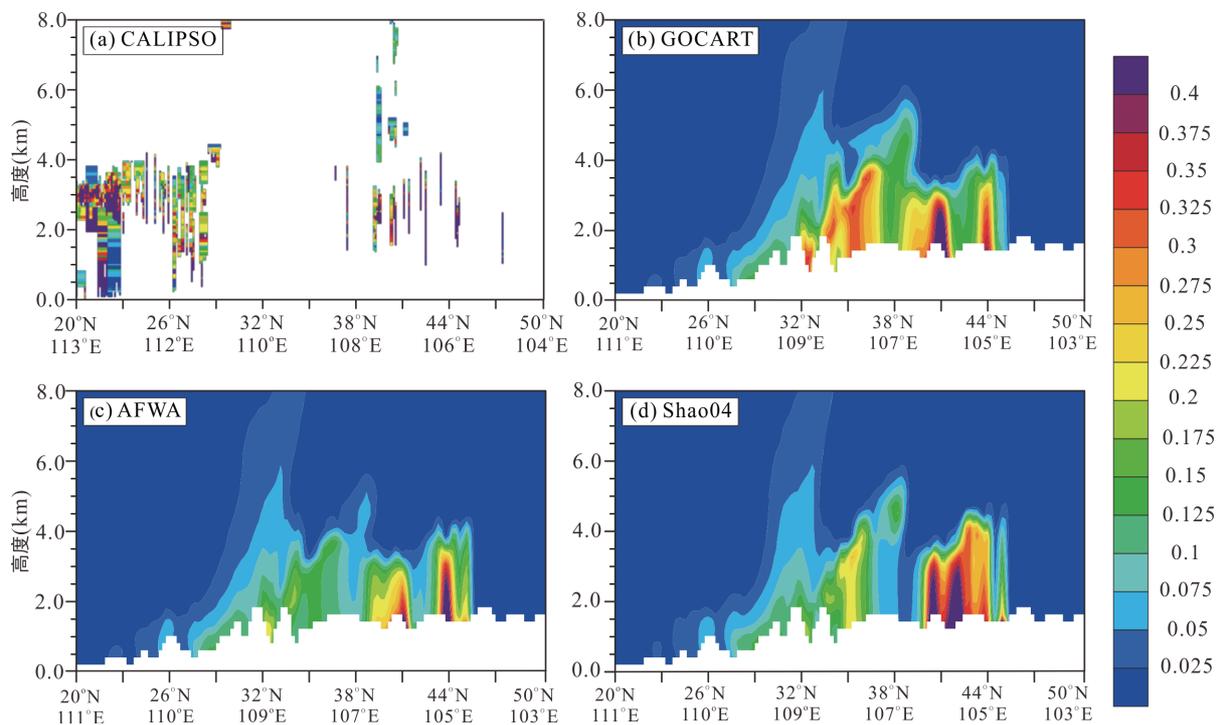


图 7 2017 年 5 月 3 日 CALIPSO 观测与模拟的气溶胶垂直结构(横坐标表示观测点的经纬度)
 Fig.7 Simulated and CALIPSO observed extinction coefficient during 3 May 2017

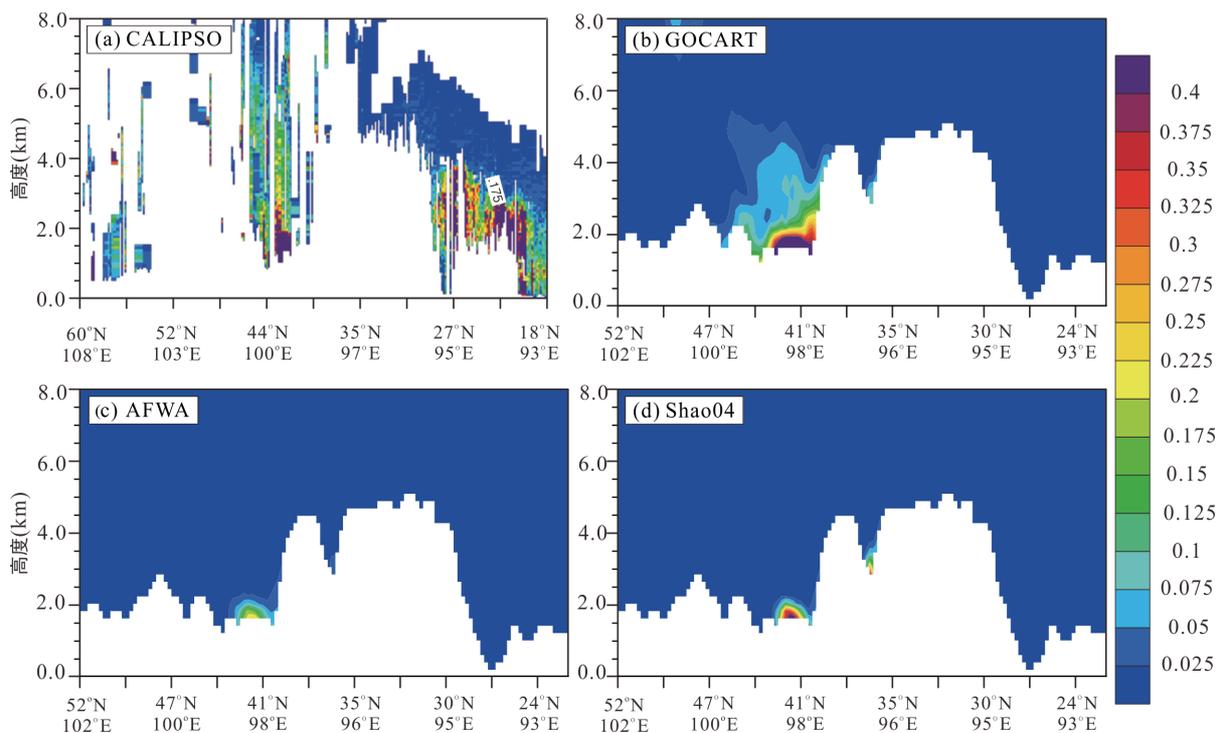


图 8 2018 年 3 月 28 日 CALIPSO 观测与模拟的气溶胶垂直结构
 Fig.8 Simulated and CALIPSO observed extinction coefficient during 28 March 2018

特征与各方案的起沙量模拟数值有较好的对应关系, 模拟结果中方案间起沙量的差异是造成 AOD 的水平分布差异的原因之一。Shao04 方案对于塔克拉玛干沙漠的起沙量模拟的数值偏低且在塔克拉玛干沙漠

区域的沙尘水平分布特征模拟效果不显著。GOCART 方案对 2 次案例特征的整体模拟效果最好, 其次为 Shao04 方案, 最后为 AFWA 方案。

(4) 综合 2 次事件模拟结果与观测数据的对比

分析,发现 GOCART 方案和 Shao04 方案均优于 AFWA 方案且具备各自的优势,但 Shao04 方案在我国最主要的沙尘源地——塔克拉玛干沙漠的起沙模拟不确定性较大,因此认为 GOCART 起沙方案相对更适用于我国西北地区的沙尘模拟。

致谢: 特别感谢南京大学黄昕副教授和另外一名匿名审稿专家对本文提出的建设性的修改意见及建议。

参考文献(References):

高会旺, 祁建华, 石金辉, 石广玉, 冯士筌. 2009. 亚洲沙尘的远距离输送及对海洋生态系统的影响. *地球科学进展*, 24(1): 1–10.

康丽泰, 陈思宇. 2017. 中国北方一次沙尘天气过程的数值模拟. *中国沙漠*, 37(2): 321–331.

刘晓东, 田良, 张小曳. 2004. 塔克拉玛干沙尘活动对下游大气 PM₁₀ 浓度的影响. *中国环境科学*, 24(5): 17–21.

刘筱冉, 王金艳, 邱继勇, 李全喜, 魏林波. 2018. 起沙方案对西北地区沙尘过程模拟的影响. *环境保护科学*, 44(4): 69–76.

王训明, 周娜, 郎丽丽, 花婷, 焦琳琳, 马文勇. 2015. 风沙活动对陆地生态系统影响研究进展. *地球科学进展*, 30(6): 627–635.

吴成来, 林朝晖. 2014. WRF/Chem 模式中两种起沙参数化方案对东亚地区一次强沙尘暴过程模拟的影响. *气候与环境研究*, 19(4): 419–436.

Che H, Zhang X Y, Xia X, Goloub P, Holben B, Zhao H, Wang Y, Zhang X C, Wang H, Blarel L, Damiri B, Zhang R, Deng X, Ma Y, Wang T, Geng F, Qi B, Zhu J, Yu J, Shi G. 2015. Ground-based aerosol climatology of China: Aerosol optical depths from the China aerosol remote sensing network (CARSONET) 2002–2013. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(13): 7619–7652.

Chen S H, Sun W Y. 2002. A one-dimensional time dependent cloud model. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 80(1): 99–118.

Chen Y, Yang K, Zhou D, Qin J, Guo X. 2010. Improving the Noah land surface model in arid regions with an appropriate parameterization of the thermal roughness length. *Journal of Hydrometeorology*, 11: 995–1006.

Choobari O A, Zawar-Reza P, Sturman A. 2014. The global distribution of mineral dust and its impacts on the climate system: A review. *Atmospheric Research*, 138: 152–165.

Flaounas E, Kotroni V, Lagouvardos K, Klose M, Flamant C, Giannaros T M. 2017. Sensitivity of the WRF-Chem (V3.6.1) model to different dust emission parametrisation:

Assessment in the broader Mediterranean region. *Geoscientific Model Development*, 10(8): 2925–2945.

Ginoux P, Chin M, Tegen I, Prospero J, Holben B, Dubovik O, Lin S J. 2001. Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model. *Journal of Geophysical Research*, 106: 20255–20274.

Grell G A, Peckham S E, Schmitz R, McKeen S A, Frost G, Skamarock W C, Eder B. 2005. Fully coupled “online” chemistry within the WRF model. *Atmospheric Environment*, 39(37): 6957–6975.

Grell G A, Dévényi D. 2002. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophysical Research Letters*, 29(6): 587–590.

Hewson M, McGowan H, Phinn S. 2012. Comparing remotely sensed and modelled aerosol properties for a region of low aerosol optical depth. 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Munich, IGARSS: 2512–2515.

Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review*, 134(9): 2318–2341.

Huang J, Minnis P, Chen B, Huang Z, Liu Z, Zhao Q, Yi H, Ayers J. 2008. Long-range transport and vertical structure of Asian dust from CALIPSO and surface measurements during PACDEX. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 113, D23212.

Huang J, Wang T, Wang W, Li Z, Yan H. 2014. Climate effects of dust aerosols over East Asian arid and semiarid regions. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 119(19): 11398–11416.

Huebert B J, Bates T, Russell P B, Shi G Y, Kim Y L, Kawamura K, Carmichael G, Nakajima T. 2003. An overview of ACE-Asia: Strategies for quantifying the relationships between Asian aerosols and their climatic impacts. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 108, D23.

Huneus N, Michael S, Balkanski Y, J G, S K, Prospero J, S B, Boucher O, Chin M, Dentener F, Diehl T, Easter R, D F, Ghan S, Ginoux P, A G, Horowitz L, Koch D, Krol M, Zender C. 2011. Global dust model intercomparison in AEROCOM. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11: 7781–7816.

Jickells T D, An Z S, Andersen K K, Baker A R, Bergametti G, Brooks N, Cao J J, Boyd P W, Duce R A, Hunter K A, Kawahata H, Kubilay N, Laroche J, Liss P S, Mahowald N, Prospero J M, Ridgwell A J, Tegen I, Torres R. 2005.

- Global iron connections between desert dust, ocean biogeochemistry, and climate. *Science*, 308(5718): 67–71.
- Jones S L, Adams-Selin R, Hunt E D, Creighton G A, Cetola J D. 2012. Update on modifications to WRF-CHEM GOCART for fine-scale dust forecasting at AFWA // American Geophysical Union Fall Meeting Abstracts. Washington D C: AGU Publication, A33D-0188.
- Jones S L, Creighton G A, Kuchera E L, George K D, Elliott A J. 2010. Adapting WRF-CHEM GOCART for fine-scale dust forecasting // American Geophysical Union Fall Meeting Abstracts. Washington D C: AGU Publication, U14A-06.
- Kim H L, Choi M H. 2015. Impact of soil moisture on dust outbreaks in East Asia: Using satellite and assimilation data. *Geophysical Research Letters*, 42(8): 2789–2796.
- Kim Y, Fu J S, Miller T L. 2010. Improving ozone modeling in complex terrain at a fine grid resolution: Part I — examination of analysis nudging and all PBL schemes associated with LSMs in meteorological model. *Atmospheric Environment*, 44(4): 523–532.
- Kok J F. 2011. A scaling theory for the size distribution of emitted dust aerosols suggests climate models underestimate the size of the global dust cycle. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(3): 1016–1021.
- Lin Y L, Farley R D, Orville H D. 1983. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *Journal of Applied Meteorology*, 22(6): 1065–1092.
- Maher B A, Prospero J M, Mackie D, Gaiero D, Hesse P P, Balkanski Y. 2010. Global connections between aeolian dust, climate and ocean biogeochemistry at the present day and at the last glacial maximum. *Earth-Science Reviews*, 99(1–2): 61–97.
- Mahowald N M, Muhs D R, Levis S, Rasch P J, Yoshioka M, Zender C S, Luo C. 2006. Change in atmospheric mineral aerosols in response to climate: Last glacial period, preindustrial, modern, and doubled carbon dioxide climates. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 111, D10202.
- Marticorena B, Bergametti G. 1995. Modeling the atmospheric dust cycle: 1. Design of a soil-derived dust emission scheme. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 100(D8): 16415–16430.
- Mielikainen J, Huang B, Huang A, Goldberg M D. 2012. GPU acceleration of the updated goddard shortwave radiation scheme in the weather research and forecasting (WRF) model. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5(2): 555–562.
- Mikami M, Shi G Y, Uno I, Yabuki S, Iwasaka Y, Yasui M, Aoki T, Tanaka T Y, Kurosaki Y, Masuda K, Uchiyama A, Matsuki A, Sakai T, Takemi T, Nakawo M, Seino N, Ishizuka M, Satake S, Fujita K, Hara Y, Suzuki J. 2006. Aeolian dust experiment on climate impact: An overview of Japan-China joint project ADEC. *Global and Planetary Change*, 52(1–4): 142–172.
- Rea D K, Snoeckx H, Joseph L H. 1998. Late Cenozoic eolian deposition in the North Pacific: Asian drying, Tibetan uplift, and cooling of the Northern Hemisphere. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 13(3): 215–224.
- Shao Y. 2004. Simplification of dust emission scheme and comparison with data. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 109, D10202.
- Shao Y P, Wyrwoll K H, Chappell A, Huang J P, Lin Z H, McTainsh G H, Mikami M, Tanaka T Y, Wang X L, Yoon S C. 2011. Dust cycle: An emerging core theme in Earth system science. *Aeolian Research*, 2(4): 181–204.
- Su L, Fung J C H. 2015. Sensitivities of WRF-Chem to dust emission schemes and land surface properties in simulating dust cycles during springtime over East Asia. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 120(21): 11215–11230.
- Sugimoto N, Hara Y, Shimizu A, Nishizawa T, Matsui I, Nishikawa M. 2013. Analysis of dust events in 2008 and 2009 using the lidar network, surface observations and the CFORS model. *Asia-Pacific Journal of the Atmospheric Sciences*, 49: 27–39.
- Sun Y, Clemens S C, Morrill C, Lin X P, Wang X L, An Z S. 2012. Influence of Atlantic meridional overturning circulation on the East Asian winter monsoon. *Nature Geoscience*, 5(1): 46–49.
- Tegen I, Fung I. 1994. Modeling of mineral dust in the atmosphere: Sources, transport, and optical thickness. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 99(D11): 22897–22914.
- Xia X, Che H, Zhu J, Chen H, Cong Z, Deng X, Fan X, Fu Y, Goloub P, Jiang H, Liu Q, Mai B, Wang P, Wu Y, Zhang J, Zhang R, Zhang X. 2016. Ground-based remote sensing of aerosol climatology in China: Aerosol optical properties, direct radiative effect and its parameterization. *Atmospheric Environment*, 124: 243–251.
- Yuan T G, Chen S Y, Huang J P, Zhang X R, Luo Y, Ma X J, Zhang G L. 2019. Sensitivity of simulating a dust storm over Central Asia to different dust schemes using the WRF-Chem model. *Atmospheric Environment*, 207: 16–29.