

中国北方未来沙尘起沙通量变化的数值模拟研究

赵剑琦 马晓燕 田蓉

南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心/中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044

摘要 本研究利用 WRF-Chem (Weather Research and Forecasting model with online coupled chemistry) 模式对未来中国北方沙尘起沙过程变化进行了模拟预测。为了提高预测结果的准确度, 研究综合考虑了气溶胶、温室气体和植被覆盖率等因素对天气、气候和起沙过程的影响。预测结果显示, 2016~2029 年西北部沙尘源地起沙量高于北部沙尘源地, 地形和气候的差异是导致两地起沙过程及其季节变化差异的主要原因。两个沙尘源地四季起沙通量呈总体减少而部分季节增加的趋势, 西北部沙尘源地起沙通量在春季总体呈上升趋势, 在夏、秋和冬季呈下降趋势; 北部沙尘源地起沙通量在春、夏和冬季呈下降趋势, 在秋季呈微弱上升趋势。两个沙尘源地各季起沙通量的变化趋势由近地面风速主导, 植被覆盖率、降水和地面温度等因素对起沙通量的年际波动有着重要影响。

关键词 动力降尺度; WRF-Chem; 起沙通量变化预测; 起沙通量变化驱动因素分析

文章编号 2021128C

中图分类号

文献标识码

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2111.21128

Modeling studies on future changes of dust emission flux over Northern China

ZHAO Jianqi, MA Xiaoyan, TIAN Rong

Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/International Joint Laboratory on Climate and Environment Change/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters/Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract: In this paper, WRF-Chem (Weather Research and Forecasting model with online coupled chemistry) model is employed to study the future changes of dust emission in Northern China. In order to improve the accuracy of the prediction results, the study comprehensively considers the influence of factors such as aerosols, greenhouse gases and vegetation fraction on the weather, climate and dust emission processes. The prediction shows, from 2016 to 2029, that the amount of dust emission in the northwestern dust source region is higher than that in the northern dust source region, and the differences of topography and climate lead to the differences of dust emission processes and their seasonal variations in the two regions. The seasonal mean dust emission fluxes in the northwestern and the northern from 2016 to 2029 show general decreasing trends, while some seasons show increasing trends. The dust emission flux in the northwestern shows a weak increasing trend in spring, and decreasing trends in summer, autumn and winter. The dust emission flux in the northern dust source region shows decreasing trends in spring, summer and winter, and a weak increasing

收稿日期 2021-07-21; 网络预出版日期

作者简介 赵剑琦, 男, 1996 年 11 月出生, 博士研究生, 主要从事大气气溶胶及其气候效应研究。E-mail: zhaojqdu@163.com

通讯作者 马晓燕, E-mail: xma@nuist.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 (42061134009); 第二次青藏高原科考项目 (2019QZKK0103); 国家自然科学基金项目 (41975002); 国家科技部重点研发专项 (2019YFA0606800)

Funded by The National Natural Science Foundation of China (42061134009); the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research (STEP) program (2019QZKK0103); the National Natural Science Foundation of China (41975002); the National Key R&D Program of China (2019YFA0606800)

trend in autumn. The variation trends of dust emission fluxes in the two regions are dominated by near-surface wind speed, while vegetation fraction, precipitation and surface temperature have important effects on the interannual fluctuation of dust emission fluxes.

Key words: dynamic downscaling; WRF-Chem; prediction of dust emission flux changes; analysis on driving factors of dust emission flux changes

沙尘气溶胶是大气气溶胶的主要组分,可以散射、吸收太阳辐射并影响云的形成和发展,进而直接或间接地影响地气系统辐射平衡和降水过程(Twomey, 1977; Albrecht, 1989; 沈志宝和魏丽, 2000; 石广玉和赵思雄, 2003; 陈勇等, 2009; 王雨等, 2017; IPCC, 2021)。中国北部和西北部的沙漠地区是世界最大的沙尘源地之一(Prospero et al., 2002; Zhang et al., 2003),因而沙尘气溶胶对中国天气和气候具有重要影响(Xie et al., 2018a, 2018b; Shi et al., 2019)。国内外学者已针对过去中国沙尘过程进行了大量研究(王小玲和翟盘茂, 2004; Chen et al., 2014; Song et al., 2017),未来中国沙尘过程变化开始得到更多重视(Mahowald and Luo, 2003; Gao and Han, 2010; 宿兴涛等, 2017)。起沙过程决定了释放到大气中的沙尘粒子的数量,是沙尘过程的重要环节。根据合理假设,将排放情景输入数值模式以获取对未来气候变化及气候变化背景下的起沙过程变化的预测信息,对于评估未来沙尘过程变化具有重要意义。

GCM(全球气候模式)是帮助了解起沙过程及其未来变化的重要工具,能够有效模拟未来起沙过程对气候变化等因素的响应。但起沙过程的数值模拟涉及到多种环境因素和关键参数,GCM较粗的模式分辨率和相对简化的物理参数化对于区域尺度的应用而言过于粗糙,可能导致模拟结果产生较大误差(Bao et al., 2015; 宿兴涛等, 2017)。与GCM相比,RCM(区域气候模式)能够以更高的分辨率和更精细的物理参数化在区域尺度内运行,可以更好地解析复杂的物理过程。动力降尺度方法指GCM为RCM提供初边值条件,通过高分辨率RCM的数值积分获得高分辨率信息。该方法已成为进行区域数值模拟和未来预测的一种常用方法,被当前东亚地区的模拟研究广泛采用(Gao et al., 2001; Giorgi, 2006; Bao et al., 2015; 孙建奇等, 2018; 姚隽琛等, 2018)。本研究使用区域大气-化学耦合模式WRF-Chem(Weather Research and Forecasting model with online coupled chemistry)对GCM数据进行动力降尺度以预测未来中国起沙通量变化,该模式包含精细的物理机制,可以综合考虑气象场和土壤属性等因素对起沙过程的影响,在进行动力降尺度、模拟气候变化背景下的起沙过程变化等方面具有独特的优势(Zhao et al., 2011; Chen et al., 2013; Kumar et al., 2014)。

1 方法与数据

1.1 WRF-Chem 模式

1.1.1 WRF-Chem 模拟设置

本研究使用的模式为WRF-Chem 3.9版本,模拟范围中心点为(36°N , 103°E),水平分辨率为30km,格点数为 180×146 ,模式垂直层为33层,大气层顶气压为100 hPa。模拟时间段为世界时2016年2月23日0时~2030年2月28日18时。以往研究表明,频繁地重启模式,将长期连续积分分割为多个较短的积分,可以避免模式偏离长期强迫、有效缓解长期积分中可能出现的系统误差问题,模拟性能优于连续模拟(Lo et al., 2008; Garcia-Diez et al., 2015; Hahmann et al., 2015)。本研究中,模式每月重启一次,每次重启预热时间为7天,模拟结果每6小时输出一次。依据地理位置和沙尘过程特性,本研究将影响中国的主要沙尘源地划分为西北部沙尘源地($77.0^{\circ}\text{E}\sim 96.0^{\circ}\text{E}$, $36.0^{\circ}\text{N}\sim 47.0^{\circ}\text{N}$)和北部沙尘源地($96.5^{\circ}\text{E}\sim 108.0^{\circ}\text{E}$, $37.0^{\circ}\text{N}\sim 46.0^{\circ}\text{N}$)两部分,模拟区域及两沙尘源地位置如图1所示。

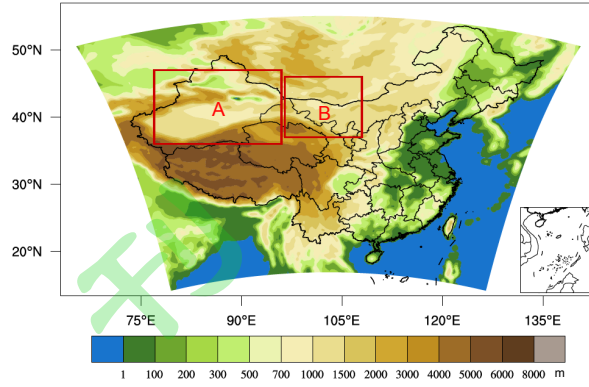


图 1 模拟区域地形图及研究区域划分 (A 和 B 分别为西北部和北部沙尘源地)

Fig.1 The topographic map of the model domain and the study area division (A and B are the dust sources in the northwestern and the northern respectively)

本研究采用了 SSP2-4.5 (The shared socioeconomic pathway 2 with the expected radiative forcing 4.5 W/m^2 in the year 2100) 排放情景, 该情景与许多气候政策情景接近, 基于该情景的预测结果具有更为现实的参考意义 (Bao et al., 2015)。参考 McSweeney et al. (2015) 的研究中对各 GCM 的评估结果, 本研究选取了其中表现较好的 MPI-ESM (the Max Planck Institute Earth System Model) 模式的高分辨率版本 MPI-ESM1-2-HR 模式在 SSP2-4.5 情景下 6h/次的模拟数据作为动力降尺度模拟的驱动气象初始和边界条件 (Müller et al., 2018)。为使模拟中包含温室气体浓度变化对气候的影响, 本研究采用了 CLWRF (CLimate WRF) 的 -DCLWRFHG 配置 (Fita et al., 2010), 温室气体数据来源于 Meinshausen et al. (2020) 的研究中 1 年/次的 SSP2-4.5 情景下北半球平均温室气体浓度。此外, 本研究将 MPI-ESM1-2-LR 模式 (MPI-ESM1-2 模式的低分辨率版本) 动态计算的 SSP2-4.5 情景下植被覆盖率数据输入 WRF-Chem 中, 使得模拟中包含植被覆盖率变化对起沙过程的影响 (Mauritsen et al., 2019)。

本研究采用 Shao01 起沙参数化方案模拟起沙过程 (Shao, 2001), 该方案基于跃变轰击和聚合体解体起沙机制, 综合考虑了土壤含水量、土壤塑性压力以及母土在最小扰动和充分扰动下的粒径分布等土壤因素和摩擦速度、空气密度等气象因素对起沙过程的影响, 对中国北方沙尘过程表现出良好的模拟能力 (Zhao et al., 2020)。在 WRF-Chem 3.9 版本中, 该方案采用五档沙尘粒径, 五档区间分别为 $0.2 \sim 2 \mu\text{m}$ 、 $2 \sim 3.6 \mu\text{m}$ 、 $3.6 \sim 6 \mu\text{m}$ 、 $6 \sim 12 \mu\text{m}$ 和 $12 \sim 20 \mu\text{m}$, 其起沙通量计算方法如下:

$$F(d_i, d_s) = c_y [(1-\gamma) + \gamma \frac{p_m(d_i)}{p_f(d_i)}] \frac{Qg}{u_*^2 m} (\rho_b \eta_{fi} \Omega + \eta_{ci} m) \quad (1)$$

式中, $F(d_i, d_s)$ 为粒径为 d_s 的沙粒跳跃轰击产生的粒径为 d_i 的沙尘的通量; c_y 为一个无量纲系数; γ 为与沙尘粒径分布有关的权重因子, 表示聚合体起沙的难易程度; $p_m(d_i)$ 和 $p_f(d_i)$ 分别为最小扰动和充分扰动下的沙尘粒径分布; g 为重力加速度; u_* 为摩擦速度; m 为沙尘粒子质量; ρ_b 为土壤密度; Ω 为沙尘粒子跳跃轰击土壤表面所产生的凹坑的体积; η_{fi} 为可被排出的沙尘的质量分数; η_{ci} 为聚合体沙尘的质量分数; Q 为粒径为 d_s 的沙尘粒子的跃移通量, 计算公式如下:

$$Q = (1 - c_f) 2.3 \frac{\rho_a}{g} u_*^3 \left(1 - \frac{u_{*t}}{u_*}\right) \left(1 + \frac{u_{*t}^2}{u_*^2}\right) p_s(d) S_b, \quad u_* > u_{*t} \quad (2)$$

式中 c_f 为植被覆盖率; ρ_a 为空气密度; u_{*t} 为临界摩擦速度; $p_s(d)$ 为空气中沙尘粒子的粒径分布; S_b 为一个二元函数, 当风蚀度指数大于 0 时 S_b 等于 1, 当风蚀度指数为 0 时 S_b 等于 0。仅当 u_* 高于 u_{*t} 时计算 Q 。

模拟中选用的其他物理和化学参数化方案设置如表 1 所示。

表 1 WRF-Chem 物理、化学和气溶胶参数化方案设置

Table 1 Namelist settings of the physical, chemistry and aerosol parameterizations used in the WRF-Chem

物理化学过程	方案编号	方案名称
微物理	28	Thompson aerosol-aware (Thompson and Eidhammer, 2014)
长波辐射	4	RRTMG (Mlawer et al., 1997)
短波辐射	4	RRTMG (Iacono et al., 2000)
地表	2	Monin-Obukhov (Pahlow et al., 2001)
陆面过程	2	Unified Noah (Chen et al., 2010)
边界层	2	MYJ (Janjić, 1994)
积云参数化	5	Grell 3D (Grell and Freitas, 2014)
化学和气溶胶	401	Dust only

1.1.2 Thompson aerosol-aware 微物理方案及其调整

为在控制计算耗费的前提下使模拟中包含气溶胶的气候效应，本研究采用了 Thompson aerosol-aware 微物理方案 (Thompson and Eidhammer, 2014)。该方案将气溶胶划分为吸湿性、作为云凝结核的“亲水”气溶胶和非吸湿性、作为冰核的“亲冰”气溶胶，其计算的气溶胶数浓度可以接入 RRTMG 辐射方案中，使气溶胶对大气辐射模拟产生直接影响 (Thompson et al., 2016)。

Thompson aerosol-aware 方案中“亲水”气溶胶数浓度为除沙尘和黑碳气溶胶外其他各类气溶胶（硫酸盐，海盐，有机碳等）数浓度之和，该方案考虑了“亲水”气溶胶的汇，并使用经验公式依据初始场计算了“亲水”气溶胶的源。本研究中采用了 CESM2 (The community earth system model version 2) 模式输出的 SSP2-4.5 情景下的月平均气溶胶数浓度数据作为“亲水”气溶胶数浓度 (Danabasoglu et al., 2020)，数据来源于 CMIP6 数据库，包含总气溶胶数浓度、沙尘气溶胶质量混合比和黑碳气溶胶质量混合比。本研究依据 Su and Fung (2015) 的研究中中国平均沙尘粒径分布、LeGrand et al. (2019) 的研究中各档沙尘的密度、Ma et al. (2018) 的研究中中国平均黑碳粒径分布和 Chin et al. (2002) 的研究中的黑碳气溶胶密度，计算沙尘和黑碳气溶胶的数浓度，将两者从总气溶胶数浓度减去后，作为“亲水”气溶胶数浓度输入模式中。

此外，Thompson aerosol-aware 方案将沙尘气溶胶作为“亲冰”气溶胶，由于该方案中未考虑“亲冰”气溶胶的排放，仅将初始场、边界条件和在线计算的云冰升华作为“亲冰”气溶胶的源，导致该方案对“亲冰”气溶胶的模拟能力较弱。为提升该方案对“亲冰”气溶胶的模拟能力，本研究依据 LeGrand et al. (2019) 的研究中各档沙尘的密度将 WRF-Chem 模式沙尘模块在线计算的五档沙尘气溶胶混合比换算为五档沙尘气溶胶数浓度，并将五档沙尘气溶胶数浓度之和作为“亲冰”气溶胶数浓度输入该方案中；同时，“亲冰”气溶胶的汇也反馈回沙尘模块作为沙尘气溶胶的湿清除项，因 Thompson aerosol-aware 微物理方案为体积参数化方案，假设各档沙尘气溶胶湿清除系数相同。此外，模拟中考虑了沙尘气溶胶的干清除过程 (Rizza et al., 2017)。

1.2 GCM 数据订正

为减小 GCM 数据的误差从而提高大尺度驱动场的质量，进而改善动力降尺度模拟的效果，本研究使用了 NNRP (NCEP-NCAR global reanalysis products) 再分析数据对 GCM 气象数据进行订正，订正方法参考了 Xu and Yang (2012) 的研究。本研究设置 Past (2000~2014 年) 和 Future (2016~2030 年) 两个时段，使用 Past 时段的 NNRP 和 GCM 数据对 Future 时段的 GCM 数据进行订正，主要订正步骤如下：

- (1) 将 6h/次的 NNRP 和 GCM 数据拆分为气候平均值 ($\overline{NNRP}$ 和 $\overline{GCM}$) 加上扰动项 ($NNRP'$ 和 GCM'):

$$NNRP = \overline{NNRP} + NNRP' \quad (3)$$

$$GCM = \overline{GCM} + GCM' \quad (4)$$

- (2) 将 Future 时段的 GCM 数据 (GCM_F) 拆分为以下形式 (下标 P 指 Past 时段)

$$GCM_F = \overline{GCM_F} + GCM_F' \quad (5)$$

$$= \overline{NNRP_P} + (\overline{GCM_P} - \overline{NNRP_P}) + (\overline{GCM_F} - \overline{GCM_P}) + GCM_F'$$

上式右侧四项中，第一项为 Past 时段 NNRP 数据的气候平均值，第二项为 Past 时段 GCM 数据平均值相较 NNRP

数据的偏差,第三项为 GCM 数据 Future 时段相较 Past 时段的气候变化,第四项为 Future 时段 GCM 数据的扰动。

(3) 通过去除式 (5) 中右侧的第二项,获取经气候平均偏差校正的 GCM 数据

$$GCM_F^* = \overline{NNRP_p} + (\overline{GCM_F} - \overline{GCM_p}) + GCM_F' \quad (6)$$

经校正的 6h/次的 GCM 数据 (GCM_F^*) 包含 Past 时段 NNRP 数据提供的基准气候、GCM 数据 Future 和 Past 时段之间的平均气候变化以及未来的气候变率。

(4) 修正 Future 时段 GCM 数据扰动值的偏差

$$GCM_F^{**} = \overline{NNRP_p} + (\overline{GCM_F} - \overline{GCM_p}) + GCM_F' \frac{S_{NNRP|p}}{S_{GCM|p}} \quad (7)$$

式中, $S_{NNRP|p}$ 和 $S_{GCM|p}$ 为 Past 时段 NNRP 和 GCM 数据的标准差。使用该方法可以对 GCM 数据的气候平均态和气候变化进行订正,并保留 GCM 数据中季节平均态、日循环和年际变化中的气候变化。本研究采用该方法对动力降尺度模拟所需的 GCM 变量(纬向和经向风、位势高度、温度、相对湿度、海面温度和海平面气压)进行订正。

1.3 观测数据

本研究使用的近地面风速观测数据来源于中国国家气象中心开发的 MICAPS (Meteorological Information Comprehensive Analysis and Process System), 包含超过 2000 个站点的观测数据; AOD (气溶胶光学厚度) 观测数据来源于 MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) MOD08_M3 数据集中结合了暗像元法和深蓝算法的 AOD 产品 (https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/order/1/MOD08_M3--61 [2021-10-27]), 该产品在大多数定量研究中表现良好 (Levy et al., 2013)。

2 预测结果评估

SSP2-4.5 情景自 2015 年开始, 2015 年及之后的动力降尺度模拟即为未来情景下的预测, 本研究首先利用卫星和地面观测数据对动力降尺度预测结果进行评估。

模拟与观测 2016~2018 年西北部沙尘源地和北部沙尘源地月、季平均近地面风速对比结果显示 (图 2), 相较观测数据, GCM 数据明显高估了近地面风速, WRF-Chem 模拟结果在 GCM 数据的基础上产生了进一步高估。但模拟结果与观测数据表现出良好的相关性, 西北部沙尘源地模拟与观测月、季平均近地面风速相关系数分别为 0.53 和 0.64; 北部沙尘源地模拟与观测月、季平均近地面风速相关系数分别为 0.61 和 0.87, 各相关系数均通过了 99% 显著性检验, 说明模拟结果能够再现沙尘源地近地面风速的时间变化特征。

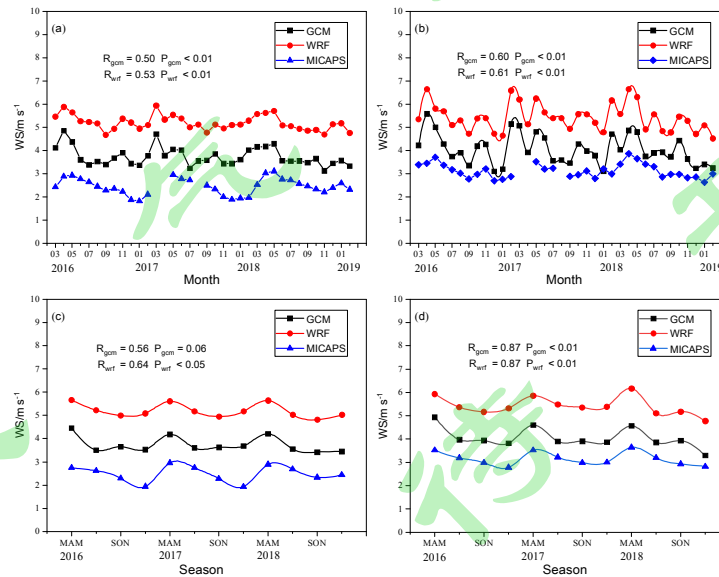


图2 2016~2018年(a, c)西北部沙尘源地和(b, d)北部沙尘源地模拟及观测(a, b)月平均和(c, d)季平均近地面风速(WS)变化(R_{gcm} 和 R_{wrf} 分别为本研究使用的GCM和WRF-Chem模拟结果与MICAPS数据的相关系数, P_{gcm} 和 P_{wrf} 为对应的显著性水平)

Fig.2 The simulated and the observed (a,b) monthly mean and (c,d) seasonal mean near-surface wind speed (WS) variations in (a,c) the northwestern and (b,d) the northern dust source regions from 2016 to 2018 (R_{gcm} and R_{wrf} are the correlation coefficients between the GCM and WRF-Chem simulation results used in this study and the MICAPS data, respectively. P_{gcm} and P_{wrf} are the corresponding significant levels)

沙尘源地 AOD 观测数据可在一定程度上表征该地区的起沙状况(Huang et al., 2007; Chen et al., 2013; 康丽泰和陈思宇, 2017), 本研究采用 2016~2020 年 MODIS AOD 数据对动力降尺度预测结果进行评估。两个沙尘源地观测和模拟 AOD 变化趋势如图 3 所示, 因 Thompson-RRTMG 耦合方案计算的 AOD 值偏低, 即使预测结果高估了近地面风速并进而高估了起沙通量和沙尘浓度, 模拟 AOD 值仍较观测值偏低。因模式对近地面风速的高估、Thompson aerosol-aware 方案对“亲水性”气溶胶排放的简化处理以及外部输入的“亲水性”气溶胶数据的误差, 模拟结果相较观测数据有着明显差异, 但能够基本再现沙尘源地观测 AOD 数据的峰值分布和年际变化特征, 说明本研究对未来中国北方起沙过程年际变化和强起沙过程的模拟预测具有一定可信度。

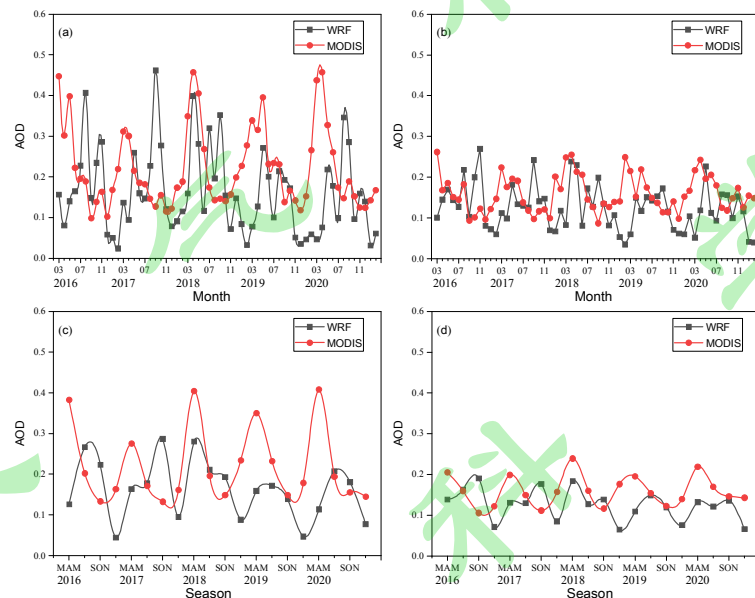


图3 2016~2020年观测和模拟(a, c)西北部沙尘源地和(b, d)北部沙尘源地(a, b)月平均和(c, d)季平均 AOD 变化

Fig.3 The observed and the simulated (a,b) monthly mean and (c,d) seasonal mean AOD variations of (a,c) the northwestern and (b,d) the northern dust source regions from 2016 to 2020

3 中国北方未来起沙过程变化

3.1 起沙通量的未来变化

2016~2029 年模拟区域四季起沙通量分布如图 4 所示。总体而言,西北部沙尘源地起沙量高于北部沙尘源地, 由于沙尘常在冲积过程中产生并于低洼处堆积, 使得地形落差较大的山脉边缘地区土壤易蚀度更高(LeGrand et al., 2019), 再加上山脉边缘地区较高的风速, 导致西北部沙尘源地主要起沙过程发生于天山山脉南部和东南部, 表现出春夏两季最强, 其次为秋季和冬季的季节变化特征; 北部沙尘源地主要起沙过程发生于区域中部的沙漠地区, 表现出由强到弱依次为春、秋、冬和夏季的季节变化特征。

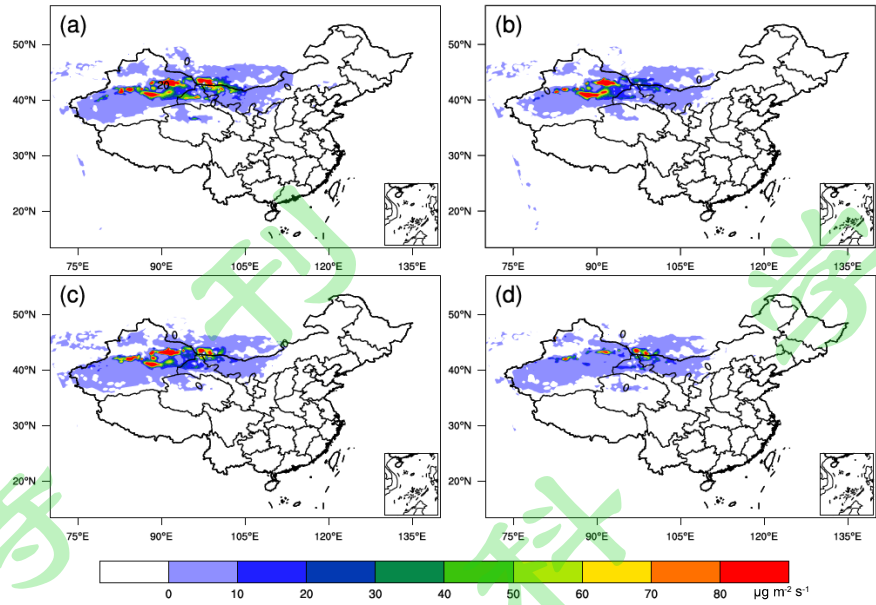


图4 2016~2029年 (a) 春、(b) 夏、(c) 秋和 (d) 冬季平均起沙通量分布

Fig.4 Distributions of the mean dust emission flux in (a) spring, (b) summer, (c) autumn and (d) winter from 2016 to 2029

预测结果显示, 2016~2029 年两沙尘源地各季起沙通量呈总体减少, 部分季节增加的变化趋势 (图 5)。西北部沙尘源地 2016~2027 年春季起沙通量呈明显的下降趋势, 但 2028~2029 年强起沙过程的出现使得西北部沙尘源地 2016~2029 年春季起沙通量总体上呈现上升趋势, 变率为 $0.17\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{s}/\text{yr}$; 西北部沙尘源地夏、秋和冬季起沙通量都呈现下降趋势, 变率分别为 $-0.13\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{s}/\text{yr}$ 、 $-0.15\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{s}/\text{yr}$ 和 $-0.08\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{s}/\text{yr}$ 。北部沙尘源地起沙通量在春、夏和冬季呈下降趋势, 变率分别为 $-0.06\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{s}/\text{yr}$ 、 $-0.12\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{s}/\text{yr}$ 和 $-0.18\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{s}/\text{yr}$; 在秋季呈弱上升趋势, 变率为 $0.03\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{s}/\text{yr}$ 。西北部沙尘源地起沙通量在春、夏、秋和冬季分别于 2029、2023、2016 和 2017 年达最大值, 于 2026、2022、2019 和 2021 年达最小值; 北部沙尘源地起沙通量在春、夏、秋和冬季分别于 2024、2027、2029 和 2022 年达最大值, 于 2019、2028、2020 和 2029 年达最小值。

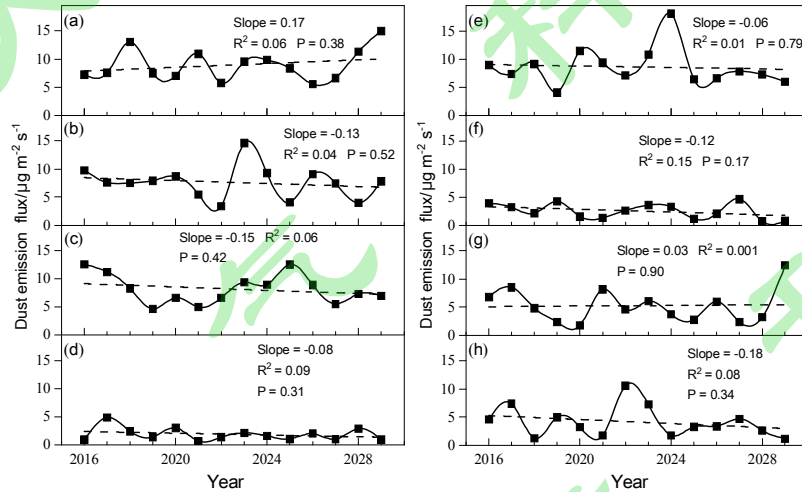


图5 2016~2029年 (a~d) 西北部沙尘源地和 (e~h) 北部沙尘源地 (a, e) 春、(b, f) 夏、(c, g) 秋和 (d, h) 冬季平均起沙通量变化

Fig.5 Variations of the seasonal mean dust emission fluxes in (a-d) the northwestern and (e-h) the northern dust source regions in (a,e) spring, (b,f) summer, (c,g) autumn and (d,h) winter from 2016 to 2029

通过图 6 展示的西北部沙尘源地和北部沙尘源地各季起沙通量百分位变化，可以直观地了解 2016~2029 年两沙尘源地起沙过程强弱变化，对强起沙过程的预测具有重要意义。总体而言，西北部沙尘源地春季和夏季起沙通量最大，但秋季也常有强起沙过程的发生，2016~2029 年最强的起沙过程发生于 2028~2029 年春季，2023~2024 年夏季，2016、2023 和 2025 年秋季。北部沙尘源地主要起沙过程发生于春季、秋季和冬季，2016~2029 年最强的起沙过程发生于 2020~2021 年和 2023~2024 年春季，2021 和 2029 年秋季以及 2017 年冬季。

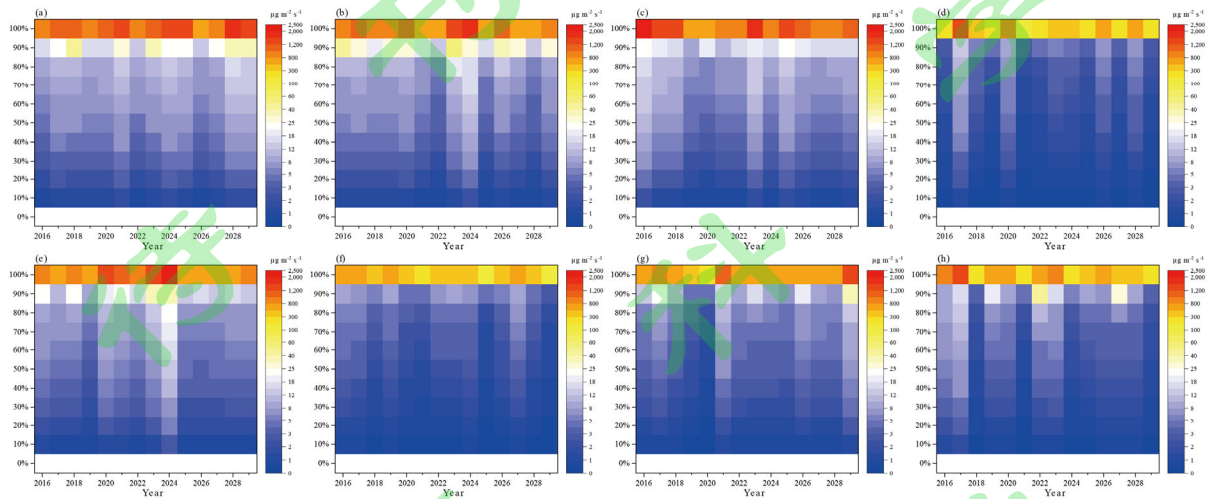


图 6 2016~2029 年 (a~d) 西北部沙尘源地和 (e~h) 北部沙尘源地 (a, e) 春、(b, f) 夏、(c, g) 秋和 (d, h) 冬季起沙通量百分位变化

Fig.6 Percentile variations of the dust emission fluxes in (a~d) the northwestern and (e~h) the northern dust source regions in (a,e) spring, (b,f) summer, (c,g) autumn and (d,h) winter from 2016 to 2029

3.2 起沙通量变化驱动因素分析

本节通过相关性分析对 2016~2029 年两沙尘源地各季起沙通量变化的驱动因素进行研究。表 2 所示为起沙通量与其影响因素的相关系数，在各因素中，西北部沙尘源地起沙通量与近地面风速表现出最强的相关性，两者在春、夏、秋和冬季相关系数分别为 0.51、0.60、0.71 和 0.15；由于地表植被对起沙过程的抑制作用，西北部沙尘源地起沙通量与植被覆盖率表现出明显的负相关性；降水可以通过影响土壤含水量等要素间接抑制起沙过程，在降水相对丰富的夏季和秋季，西北部沙尘源地起沙通量与降水量表现出明显的负相关性 ($R=-0.54$ 和 -0.35)；地表温度通过影响风场和土壤属性等要素间接影响起沙过程，在春、夏和冬季与起沙通量相关性较弱，但在秋季与西北部沙尘源地起沙通量表现出明显的负相关性 ($R=-0.78$)。与西北部沙尘源地相同，北部沙尘源地起沙通量与近地面风速在各个季节都表现出明显的正相关性；植被覆盖率对北部沙尘源地起沙过程的抑制作用主要体现在植被覆盖率较高的夏季 ($R=-0.50$)、秋季 ($R=-0.34$) 和春季 ($R=-0.31$)；北部沙尘源地夏季降水量最大，但因该季节北部沙尘源地起沙过程最弱，起沙通量与降水量未表现出明显的相关性，两者相关性在起沙和降水过程都相对较强的秋季最为明显 ($R=-0.53$)；北部沙尘源地地表温度与起沙通量在该地区起沙过程最强的春季和秋季表现出较明显的负相关性 ($R=-0.38$ 和 -0.39)。

表 2 各季节起沙通量与其影响因素的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between the dust emission flux and its relevant elements in various seasons

西北部沙尘源地	春季	夏季	秋季	冬季
近地面风速	0.51	0.60	0.71	0.15
降水量	-0.02	-0.54	-0.35	0.09

地表温度	-0.12	-0.06	-0.78	0.11
植被覆盖率	0.09	-0.34	-0.62	-0.53
北部沙尘源地	春季	夏季	秋季	冬季
近地面风速	0.72	0.76	0.78	0.57
降水量	-0.15	0.07	-0.53	-0.11
地表温度	-0.38	-0.07	-0.39	0.10
植被覆盖率	-0.31	-0.50	-0.34	-0.15

作为影响起沙过程的主要因素，2016~2029 年西北部沙尘源地和北部沙尘源地各季近地面风速表现出与起沙通量接近的年际变化特征（图 7）。西北部沙尘源地近地面风速在春季和夏季呈弱下降趋势，在秋季和冬季呈弱上升趋势。北部沙尘源地近地面风速在春季呈弱下降趋势，在秋季呈弱上升趋势，在夏季和冬季分别呈较明显的下降和上升趋势，变率分别为-0.01m/s/yr 和 0.01m/s/yr。

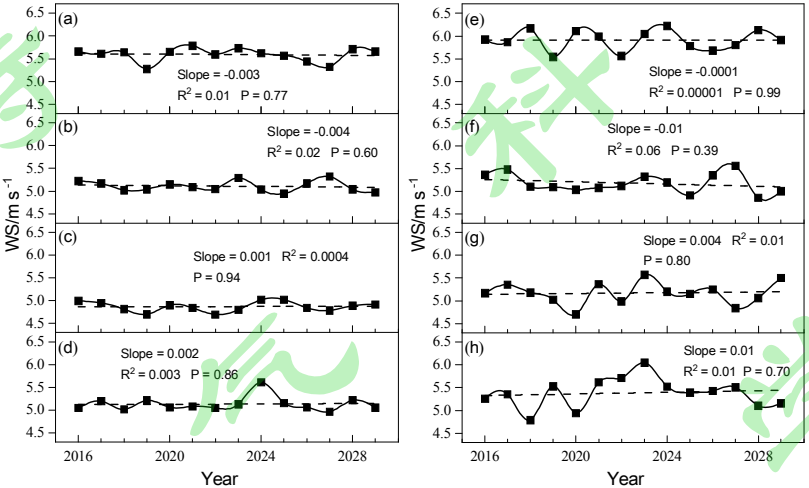


图 7 2016~2029 年（a~d）西北部沙尘源地和（e~h）北部沙尘源地（a，e）春、（b，f）夏、（c，g）秋和（d，h）冬季平均近地面风速（WS）变化

Fig.7 Variations of the seasonal mean near-surface wind speed (WS) in (a-d) the northwestern and (e-h) the northern dust source regions in (a,e) spring, (b,f) summer, (c,g) autumn and (d,h) winter from 2016 to 2029

2016~2029 年西北部沙尘源地和北部沙尘源地四季植被覆盖率都呈现出明显的上升趋势（图 8），因北部沙尘源地具有相对更适宜的植被生长环境，该地区植被覆盖率上升幅度大于西北部沙尘源地。两地夏季植被覆盖率上升趋势最为明显，分别达 0.1%/yr 和 0.3%/yr，其次为春、秋和冬季。

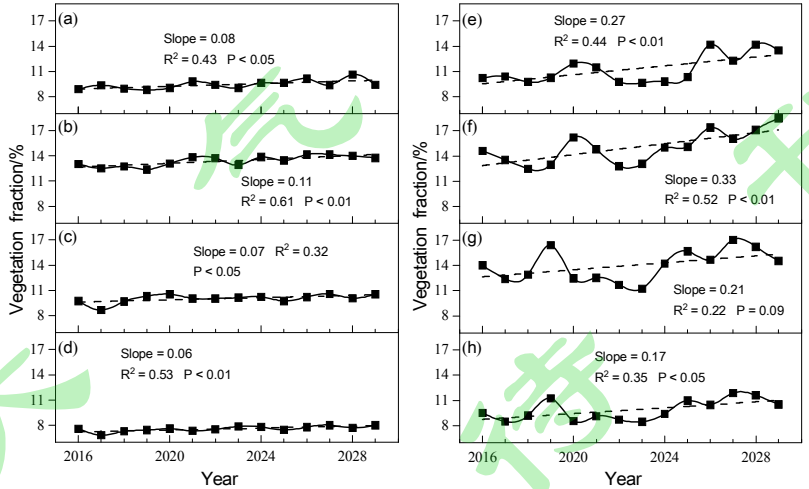


图 8 2016~2029 年（a~d）西北部沙尘源地和（e~h）北部沙尘源地（a，e）春、（b，f）夏、（c，g）秋和（d，h）冬季平均近地面植被覆盖率变化

h) 冬季平均植被覆盖率变化

Fig.8 Variations of the seasonal mean vegetation fraction in (a–d) the northwestern and (e–h) the northern dust source regions in (a,e) spring, (b,f) summer, (c,g) autumn and (d,h) winter from 2016 to 2029

2016~2029 年西北部沙尘源地和北部沙尘源地各季地表温度（图 9）和降水量（图 10）年际波动明显，但长期变化趋势较弱。相对而言，两地地表温度在夏季和冬季具有较强的变化趋势，在西北部沙尘源地两季变率分别为 $0.05^{\circ}\text{C}/\text{yr}$ 和 $-0.07^{\circ}\text{C}/\text{yr}$ ，在北部沙尘源地分别为 $0.03^{\circ}\text{C}/\text{yr}$ 和 $-0.11^{\circ}\text{C}/\text{yr}$ 。相较西北部沙尘源地，北部沙尘源地夏季升温幅度较小，但冬季降温幅度更大。西北部沙尘源地春季平均降水量在 2016~2029 年呈 $-0.01\text{mm}/\text{d}/\text{yr}$ 的减少趋势，在其他季节无明显变化趋势。北部沙尘源地春、夏两季降水减少，变率分别为 $-0.005\text{mm}/\text{d}/\text{yr}$ 和 $-0.01\text{mm}/\text{d}/\text{yr}$ ；秋季降水增加，变率为 $0.01\text{mm}/\text{d}/\text{yr}$ ；冬季无明显变化。

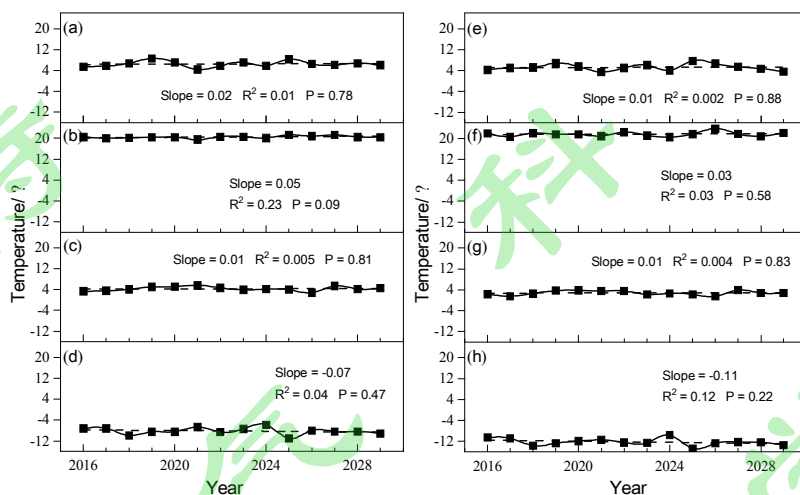


图 9 2016~2029 年 (a~d) 西北部沙尘源地和 (e~h) 北部沙尘源地 (a, e) 春、(b, f) 夏、(c, g) 秋和 (d, h) 冬季平均地表温度变化

Fig.9 Variations of the seasonal mean surface temperature in (a–d) the northwestern and (e–h) the northern dust source regions in (a,e) spring, (b,f) summer, (c,g) autumn and (d,h) winter from 2016 to 2029

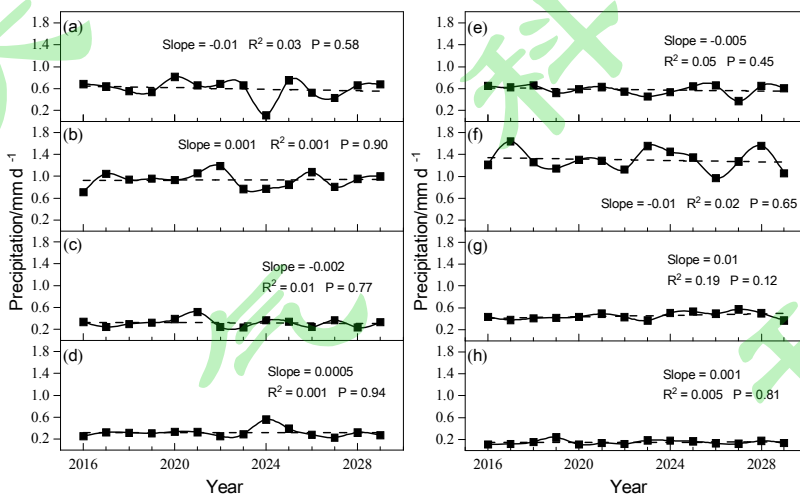


图 10 2016~2029 年 (a~d) 西北部沙尘源地和 (e~h) 北部沙尘源地 (a, e) 春、(b, f) 夏、(c, g) 秋和 (d, h) 冬季平均日降水量变化

Fig.10 Variations of the seasonal mean daily precipitation in (a–d) the northwestern and (e–h) the northern dust source regions in (a,e) spring, (b,f) summer, (c,g) autumn and (d,h) winter from 2016 to 2029

4 结论

本研究利用 WRF-Chem 模式对经订正的 MPI-ESM-HR 模式数据进行动力降尺度, 预测了 SSP2-4.5 情景下中国北方起沙过程的变化。与地面和卫星观测资料的对比结果显示, WRF-Chem 动力降尺度模拟较好地再现了沙尘源地近地面风速的强弱变化趋势并能够基本把握沙尘源地 AOD 的峰值分布和年际变化特征。总体而言, 动力降尺度模拟对中国北方起沙通量年际变化和强起沙过程的预测结果具有一定的可信度。

预测结果显示, 2016~2029 年西北部沙尘源地和北部沙尘源地各季起沙通量呈总体下降, 部分季节上升的年际变化趋势, 西北部沙尘源地 2016~2027 年春季起沙通量呈明显的下降趋势, 但 2028~2029 年强起沙过程的出现使得 2016~2029 年西北部沙尘源地春季起沙通量总体上呈现弱上升趋势, 夏、秋和冬季西北部沙尘源地起沙通量都呈现下降趋势; 北部沙尘源地起沙通量在春、夏和冬季呈下降趋势, 在秋季呈弱上升趋势。总体而言, 西北部沙尘源地春季和夏季起沙通量最大, 但秋季也常有强起沙过程的发生, 2016~2029 年最强的起沙过程发生于 2028~2029 年春季, 2023~2024 年夏季, 2016、2023 和 2025 年秋季。北部沙尘源地主要起沙过程发生于春季、秋季和冬季, 2016~2029 年最强的起沙过程发生于 2020~2021 年和 2023~2024 年春季, 2021 和 2029 年秋季以及 2017 年冬季。

西北部沙尘源地和北部沙尘源地起沙过程及其变化特征的差异主要由地形和气候因素导致, 前者沙漠广布, 植被稀少, 且地处内陆深处, 三面山脉环绕, 水汽难以抵达, 土壤湿度极低, 缺乏对起沙过程的有效限制; 后者主要地形为沙漠和草原, 相较前者有着更高的植被覆盖率和土壤湿度, 对起沙过程有着更强的抑制作用, 故虽北部沙尘源地近地面风速高于西北部沙尘源地, 起沙量却明显低于西北部沙尘源地。西北部沙尘源地起沙通量的季节变化主要受近地面风速影响, 表现出春夏两季最高, 其次为秋季和冬季的季节变化特征; 北部沙尘源地起沙通量的季节变化受近地面风速、植被覆盖率和降水等因素的共同影响, 表现出由强到弱依次为春、秋、冬和夏季的季节变化特征。两沙尘源地各季起沙过程的年际变化趋势由近地面风速主导, 起沙通量与近地面风速表现出接近的强弱变化趋势; 植被覆盖率、降水和地面温度等因素对起沙通量的年际波动有着重要影响, 如 2029 年春季西北部沙尘源地出现的近地面风速下降趋势下起沙通量大幅上升的现象主要由植被覆盖率逆趋势下降导致。

致谢 感谢南京信息工程大学大气物理学院提供的算力支持, 感谢南京信息工程大学气象台提供的 MICAPS (Meteorological Information Comprehensive Analysis and Process System) 数据和美国国家航空航天局 (NASA) 提供的 MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) 数据。

参考文献 (References)

- Albrecht B A. 1989. Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness [J]. *Science*, 245(4923): 1227-1230. doi:10.1126/science.245.4923.1227
- Bao J W, Feng J M, Wang Y L. 2015. Dynamical downscaling simulation and future projection of precipitation over China [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120(16): 8227-8243. doi:10.1002/2015JD023275
- Chen S Y, Huang J P, Zhao C, et al. 2013. Modeling the transport and radiative forcing of Taklimakan dust over the Tibetan Plateau: A case study in the summer of 2006 [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118(2): 797-812. doi:10.1002/jgrd.50122
- Chen S Y, Zhao C, Qian Y, et al. 2014. Regional modeling of dust mass balance and radiative forcing over East Asia using WRF-Chem [J]. *Aeolian Res.*, 15: 15-30. doi:10.1016/j.aeolia.2014.02.001
- 陈勇, 陈德辉, 王宏, 等. 2009. 沙尘辐射效应对天气和沙尘输送影响的数值模拟 [J]. *大气科学*, 33(1): 38-50. Chen Yong, Chen Dehui, Wang Hong, et al. 2009. Numerical simulations of dust radiative heating on the duststorm transport and meteorological fields by using an interactive weather-dust model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33(1): 38-50. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2009.01.04
- Chen Y Y, Yang K, Zhou D G, et al. 2010. Improving the Noah land surface model in arid regions with an appropriate parameterization of the

- thermal roughness length [J]. *J. Hydrometeorol.*, 11(4): 995-1006. doi:10.1175/2010JHM1185.1
- Chin M, Ginoux P, Kinne S, et al. 2002. Tropospheric aerosol optical thickness from the GOCART model and comparisons with satellite and sun photometer measurements [J]. *J. Atmos. Sci.*, 59(3):461-483. doi:10.1175/1520-0469(2002)059<0461:TAOTFT>2.0.CO;2
- Danabasoglu G, Lamarque J F, Bacmeister J, et al. 2020. The community earth system model version 2 (CESM2) [J]. *J. Adv. Model. Earth Sy.*, 12(2). doi:10.1029/2019MS001916
- Fita L, Fernández J, García-Díez M. 2010. CLWRF: WRF modifications for regional climate simulation under future scenarios [C]// *Proceedings of 11th WRF Users' Workshop*, 22-24.
- Gao T, Han J W. 2010. Evolutionary characteristics of the atmospheric circulations for frequent and infrequent dust storm springs in northern China and the detection of potential future seasonal forecast signals [J]. *Met. Apps*, 17(1): 76-87. doi:10.1002/met.163
- Gao X J, Zhao Z C, Ding Y H, et al. 2001. Climate change due to greenhouse effects in China as simulated by a regional climate model [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 18(6): 1224-1230. doi:10.1007/s00376-001-0036-y
- Garcia-Díez M, Fernandez J, Vautard R. 2015. An RCM multi-physics ensemble over Europe: multi-variable evaluation to avoid error compensation [J]. *Climate Dyn.*, 45(11-12): 3141-3156. doi:10.1007/s00382-015-2529-x
- Giorgi F. 2006. Regional climate modeling: Status and perspectives [C]// *EDP sciences*, 139: 101-118.
- Grell G A, Freitas S R. 2014. A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 14(10): 5233-5250. doi:10.5194/acp-14-5233-2014
- Hahmann A N, Vincent C L, Peña A, et al. 2015. Wind climate estimation using WRF model output: method and model sensitivities over the sea [J]. *Int. J. Climatol.*, 35(12): 3422-3439. doi:10.1002/joc.4217
- Huang J P, Minnis P, Yi Y H, et al. 2007. Summer dust aerosols detected from CALIPSO over the Tibetan Plateau [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34(18). doi:10.1029/2007GL029938
- Iacono M J, Mlawer E J, Clough S A, et al. 2000. Impact of an improved longwave radiation model, RRTM, on the energy budget and thermodynamic properties of the NCAR community climate model, CCM3 [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 105(D11): 14873-14890. doi:10.1029/2000JD900091
- IPCC. 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis [M]. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- Janjić Z I. 1994. The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes [J]. *Mon. Weather Rev.*, 122(5): 927-945. doi:10.1175/1520-0493(1994)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2
- 康丽泰, 陈思宇. 2017. 中国北方一次沙尘天气过程的数值模拟 [J]. *中国沙漠*, 37(2): 321-331. Kang Litai, Chen Siyu. 2017. Numerical modeling of a dust storm process in Northern China [J]. *J. Desert Res.*, 37(2): 321-331. doi:10.7522/j.issn.1000-694X.2015.00246
- Kumar R, Barth M C, Pfister G G, et al. 2014. WRF-Chem simulations of a typical pre-monsoon dust storm in northern India: influences on aerosol optical properties and radiation budget [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 14(5): 2431-2446. doi:10.5194/acp-14-2431-2014
- LeGrand S L, Polashenski C, Letcher T W, et al. 2019. The AFWA dust emission scheme for the GOCART aerosol model in WRF-Chem v3.8.1 [J]. *Geosci. Model Dev.*, 12(1): 131-166. doi:10.5194/gmd-12-131-2019
- Levy R C, Mattoo S, Munchak L A, et al. 2013. The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 6(11):2989-3034. doi:10.5194/amt-6-2989-2013
- Lo J C F, Yang Z L, Pielke Sr R A. 2008. Assessment of three dynamical climate downscaling methods using the Weather Research and Forecasting (WRF) model [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 113(D9). doi:10.1029/2007JD009216
- Ma X X, Liu H N, Wang X Y, et al. 2018. Studies on the climate effects of black carbon aerosols in China and their sensitivity to particle size and optical parameters [J]. *Adv. Meteorol.*, 2018:1-16. doi:10.1155/2018/9341026
- Mahowald N M, Luo C. 2003. A less dusty future? [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30(17). doi:10.1029/2003GL017880
- Mauritsen T, Bader J, Becker T, et al. 2019. Developments in the MPI-M Earth System Model version 1.2 (MPI-ESM1.2) and its response to increasing CO₂ [J]. *J. Adv. Model. Earth Sy.*, 11(4): 998-1038. doi:10.1029/2018MS001400

- McSweeney C F, Jones R G, Lee R W, et al. 2015. Selecting CMIP5 GCMs for downscaling over multiple regions [J]. *Climate Dyn.*, 44(11): 3237-3260. doi:10.1007/s00382-014-2418-8
- Meinshausen M, Nicholls Z R, Lewis J, et al. 2020. The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500 [J]. *Geosci. Model Dev.*, 13(8): 3571-3605. doi:10.5194/gmd-13-3571-2020
- Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 102(D14): 16663-16682. doi:10.1029/97JD00237
- Müller W A, Jungclaus J H, Mauritsen T, et al. 2018. A higher-resolution version of the Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM1.2-HR) [J]. *J. Adv. Model. Earth Sy.*, 10(7): 1383-1413. doi:10.1029/2017MS001217
- Pahlow M, Parlange M B, Porté-Agel F. 2001. On Monin-Obukhov similarity in the stable atmospheric boundary layer [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 99(2): 225-248. doi:10.1023/A:1018909000098
- Prospero J M, Ginoux P, Torres O, et al. 2002. Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product [J]. *Rev. Geophys.*, 40(1): 1-2. doi:10.1029/2000RG000095
- Rizza U, Barnaba F, Miglietta M M, et al. 2017. WRF-Chem model simulations of a dust outbreak over the central Mediterranean and comparison with multi-sensor desert dust observations [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 17(1):93-115. doi:10.5194/acp-17-93-2017
- Shao Y P. 2001. A model for mineral dust emission [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 106(D17): 20239-20254. doi:10.1029/2001JD900171
- 沈志宝, 魏丽. 2000. 我国西北大气沙尘气溶胶的辐射效应 [J]. *大气科学*, 24(4): 541-548. Shen Zhibao, Wei Li. 2000. Radiative effects of atmospheric dust aerosol in Northwest China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 24(4): 541-548. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2000.04.10
- 石广玉, 赵思雄. 2003. 沙尘暴研究中的若干科学问题 [J]. *大气科学*, 27(4): 591-606. Shi Guangyu, Zhao Sixiong. 2003. Several scientific issues of studies on the dust storms [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 27(4): 591-606. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.04.11
- Shi Z G, Xie X N, Li X Z, et al. 2019. Snow-darkening versus direct radiative effects of mineral dust aerosol on the Indian summer monsoon onset: role of temperature change over dust sources [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 1605-1622. doi:10.5194/acp-19-1605-2019
- Song H Q, Wang K, Zhang Y, et al. 2017. Simulation and evaluation of dust emissions with WRF-Chem (v3.7.1) and its relationship to the changing climate over East Asia from 1980 to 2015 [J]. *Atmos. Environ.*, 167: 511-522. doi:10.1016/j.atmosenv.2017.08.051
- Su L, Fung J C. 2015. Sensitivities of WRF-Chem to dust emission schemes and land surface properties in simulating dust cycles during springtime over East Asia [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120(21):11-215. doi:10.1002/2015JD023446
- 宿兴涛, 张志标, 欧磊. 2017. A1B情景下东亚地区未来春季沙尘变化趋势预估 [J]. *中国沙漠*, 37(2): 315-320. Su Xingtao, Zhang Zhibiao, Ou Lei. 2017. Prediction on dust in spring during 2015-2100 over East Asia under A1B scenario [J]. *J. Desert Res.*, 37(2): 315-320. doi:10.7522/j.issn.1000-694X.2015.00226
- 孙建奇, 马洁华, 陈活泼, 等. 2018. 降尺度方法在东亚气候预测中的应用 [J]. *大气科学*, 42(4): 806-822. Sun Jianqi, Ma Jiehua, Chen Huopo, et al. 2018. Application of Downscaling Methods in the East Asian Climate Prediction [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 42(4): 806-822. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17266
- Thompson G, Eidhammer T. 2014. A study of aerosol impacts on clouds and precipitation development in a large winter cyclone [J]. *J. Atmos. Sci.*, 71(10): 3636-3658. doi:10.1175/JAS-D-13-0305.1
- Thompson G, Tewari M, Ikeda K, et al. 2016. Explicitly-coupled cloud physics and radiation parameterizations and subsequent evaluation in WRF high-resolution convective forecasts [J]. *Atmos. Res.*, 168: 92-104. doi:10.1016/j.atmosres.2015.09.005
- Twomey S. 1977. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds [J]. *J. Atmos. Sci.*, 34(7): 1149-1152. doi:10.1175/1520-0469(1977)034<1149:TIOPOT>2.0.CO;2
- 王小玲, 翟盘茂. 2004. 中国春季沙尘天气频数的时空变化及其与地面风压场的关系 [J]. *气象学报*, 62(1): 96-103. Wang Xiaoling, Zhai Panmao. 2004. The spatial and temporal variations of spring dust storms in China and its associations with surface winds and sea

level pressures [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 62(1): 96-103. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2004.01.011

- 王雨, 银燕, 陈倩, 等. 2017. 沙尘气溶胶作为冰核对阿克苏地区一次多单体型强对流风暴降水及其微物理过程影响的数值模拟研究 [J]. *大气科学*, 41(1): 15-29. Wang Yu, Yin Yan, Chen Qian, et al. 2017. A numerical study of the effect of aerosols acting as ice nuclei on the precipitation and microphysical processes in a multi-size convective storm occurring in Aksu in Xinjiang, Northwest China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 41(1): 15-29. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1605.15246
- Xie X N, Liu X D, Che H Z, et al. 2018a. Modeling East Asian dust and its radiative feedbacks in CAM4-BAM [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 123, 1079-1096. doi:10.1002/2017JD027343
- Xie X N, Liu X D, Che H Z, et al. 2018b. Radiative feedbacks of dust-in-snow over eastern Asia in CAM4-BAM [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 12683-12698. doi:10.5194/acp-18-12683-2018
- Xu Z F, Yang Z L. 2012. An improved dynamical downscaling method with GCM bias corrections and its validation with 30 years of climate simulations [J]. *J. Climate*, 25(18): 6271-6286. doi:10.1175/JCLI-D-12-00005.1
- 姚隽琛, 周天军, 邹立维. 2018. 基于气候系统模式FGOALS-g2的热带气旋活动及其影响的动力降尺度模拟 [J]. *大气科学*, 42(1): 150-163. Yao Junchen, Zhou Tianjun, Zou Liwei. 2018. Dynamical Downscaling of Tropical Cyclone and Associated Rainfall Simulations of FGOALS-g2 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 42(1): 150-163. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1704.17129
- Zhang X Y, Gong S L, Zhao T L, et al. 2003. Sources of Asian dust and role of climate change versus desertification in Asian dust emission [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30(24). doi:10.1029/2003GL018206
- Zhao C, Liu X H, Ruby Leung L, et al. 2011. Radiative impact of mineral dust on monsoon precipitation variability over West Africa [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 11(5): 1879-1893. doi:10.5194/acp-11-1879-2011
- Zhao J Q, Ma X Y, Wu S Q, et al. 2020. Dust emission and transport in Northwest China: WRF-Chem simulation and comparisons with multi-sensor observations [J]. *Atmos. Res.*, 241: 104978. doi:10.1016/j.atmosres.2020.104978