

王继康,江琪,尤媛,等,2021. 东南亚生物质燃烧对我国霾和降水的影响[J]. 气象,47(3):348-358. Wang J K, Jiang Q, You Y, et al, 2021. Effects of biomass burning aerosol in Southeast Asia on haze and precipitation over China[J]. Meteor Mon, 47(3): 348-358(in Chinese).

东南亚生物质燃烧对我国霾和降水的影响^{*}

王继康 江 琪 尤 媛 饶晓琴 盛 黎 桂海林 花 丛 张碧辉

国家气象中心, 北京 100081

提 要: 基于生物质燃烧排放源清单、地面观测和数值模式对东南亚中南半岛生物质燃烧气溶胶的排放特征, 以及其在 2020 年春季对我国云南地区霾天气和南方前汛期降水过程的影响进行了分析。结果表明: 中南半岛生物质燃烧气溶胶排放主要集中于每年 3—4 月, 排放峰值时段集中于 3 月下旬至 4 月上旬, 主要排放区域为缅甸东部和老挝北部。中南半岛生物质燃烧气溶胶在地面主要影响我国云南南部城市的霾天气, 缅甸的生物质燃烧气溶胶是最主要的贡献源。中南半岛生物质燃烧气溶胶在低空西南急流作用下, 可以在 800~600 hPa 高度传输至我国华南和江南南部大部分区域上空。传输至我国南方上空的生物质燃烧气溶胶通过抑制对流性降水、增强非对流性降水, 可以改变南方前汛期降水过程的空间分布, 使降水更集中于切变线附近。

关键词: 中南半岛, 生物质燃烧气溶胶, 霾, 前汛期降水

中图分类号: X16, P457

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.03.008

Effects of Biomass Burning Aerosol in Southeast Asia on Haze and Precipitation over China

WANG Jikang JIANG Qi YOU Yuan RAO Xiaoqin SHENG Li
GUI Hailin HUA Cong ZHANG Bihui

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: A fire inventory, surface monitoring data and numerical models were used to analyze the biomass burning aerosol (BBA) emission in Indochina Peninsula and its effects on haze in Southwest China and pre-monsoon precipitation in South China. The BBA emissions in Indochina Peninsula mainly occur in March and April every year, and the peak emissions appear in late March to early April. Eastern Myanmar and Northern Laos are the major regions of the BBA emissions. The BBA in Indochina Peninsula mainly affects the haze in the southern cities of Yunnan, China at the surface. The emission from Myanmar is the most significant contributor to the pollution in these cities. The BBA in Indochina Peninsula could be transported over most parts of Southern China by the low-level southwest jet at the height from 800 hPa to 600 hPa. The transported BBA over Southern China could alter the spatial fraction of the pre-monsoon precipitation process by suppressing the convective precipitation and enhancing the non-convective precipitation, and making precipitation more concentrated near the shear line.

Key words: Indochina Peninsula, biomass burning aerosol (BBA), haze, pre-monsoon precipitation

^{*} 国家自然科学基金项目(41875181)、中国气象局预报员专项(CMAYBY2020-160)和国家重点研发计划(2019YFC0214602)共同资助

2020 年 10 月 14 日收稿; 2021 年 1 月 5 日收修定稿

第一作者: 王继康, 主要从事环境气象模拟预报工作. E-mail: wjk_1990@126.com

引言

以农田废弃物焚烧、森林大火为主的生物质燃烧对于一个区域甚至全球来说都是重要的温室气体、痕量气体和大气颗粒物排放源(Ito et al, 2007; Wiedinmyer et al, 2010)。据估计,生物质燃烧排放的一氧化碳将近占全球一氧化碳排放总量的一半(Bergamaschi et al, 2000),黑碳排放超过全球黑碳排放总量的三分之一(Bond et al, 2013)。Wiedinmyer et al(2010)研究表明东南亚和中美洲是春季全球主要的生物质燃烧排放地区。

东南亚地区生物质燃烧排放的污染物可以通过亚洲季风的作用影响东亚及周边地区(Huang et al, 2013; 张玉洽等, 2016; Fang et al, 2020),影响范围可以达到下风向的西太平洋地区(Liu et al, 2003; Xue et al, 2020)。Huang et al(2013)利用数值模式、地面观测和卫星数据研究表明东南亚地区的生物质燃烧对中国南部、南海和台湾海峡地区的春季光学厚度贡献可达26%~62%。张玉洽等(2016)利用数值模式模拟表明东南亚地区的生物质燃烧对我国云南地区3月的PM_{2.5}质量浓度贡献达20 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,其对我国西南地区春季的空气质量影响不可忽视。Xue et al(2020)研究表明东南亚地区的生物质燃烧可导致夏威夷等地的臭氧浓度上升约10%。以上研究多集中于东南亚地区生物质燃烧对污染物的量化研究,而针对东南亚地区生物质燃烧排放气溶胶对我国南方地区霾天气影响方式的研究较少。

生物质燃烧排放大量的黑碳等吸光性气溶胶,对辐射强迫、气候变化产生较大的影响(闫才青等, 2014; Bond et al, 2013)。很多关于非洲、亚马孙地区影响研究表明,生物质燃烧气溶胶可以对当地降水预报产生较大的影响(Wilcox, 2012; Kolusu et al, 2015)。但是关于东南亚地区生物质燃烧气溶胶对降水影响的研究较少, Lee et al(2014)研究认为东南亚生物质燃烧产生气溶胶的直接辐射强迫可以减少东亚地区前汛期40%的降水量。另外, Huang et al(2016)分析了我国长三角区域生物质燃烧气溶胶的辐射效应对降水过程的影响,认为生物质燃烧气溶胶可以抑制白天对流降水,增强下风向区域夜间降水。石荣光等(2015)分析指出气溶胶对降水影响存在时间不一致性。前汛期的降水预报是我国南

方降水预报的重要部分(陈涛等, 2020; 胡宁等, 2020)。因此,需要针对东南亚地区生物质燃烧对我国南方前汛期降水过程的影响做更进一步的分析。

本文基于2020年春季东南亚生物质燃烧过程,通过数值模拟和天气特征分析等方法,对东南亚地区生物质燃烧排放气溶胶对我国西南地区霾天气过程的影响进行分析,为我国春季西南地区霾天气预报提供参考。同时,本文利用数值模式分析生物质燃烧排放气溶胶的辐射反馈作用对我国华南地区前汛期降水过程的影响,为受高浓度生物质燃烧排放气溶胶影响下的华南前汛期降水预报提供参考。

1 数据和方法

本文PM_{2.5}观测数据的国内部分来自中国环境监测总站,东南亚部分来自当地环境监测公布数据。降雨、风等地面气象观测数据来自中国气象局。

本文火点监测和生物质燃烧排放数据使用的是NCAR发布的火点源排放清单(Fire INventory from NCAR, FINN)。FINN基于卫星观测的火点数据、地表覆盖数据和相应的排放系数制作而成,是生物质开放燃烧排放研究的重要参考(Wiedinmyer et al, 2010),并应用于多种空气质量模式(张玉洽等, 2016; Xue et al, 2020; Jiang et al, 2012; Hu et al, 2016)。

本文采用扩展的综合空气质量模式(Comprehensive Air Quality Model with Extensions v6.2, CAMx)对研究时段的PM_{2.5}来源进行分析。CAMx是由美国开发的空气质量模式(ENVIRON, 2015),该模式被广泛地应用于空气质量模拟分析(王继康等, 2017; Itahashi et al, 2018; Bo et al, 2019)。CAMx模式提供了污染物来源示踪技术,可以定量描述颗粒物等污染物来源。本文模拟选用CB05气相化学机制(Carbon Bond, Chemical Mechanism, 2005)。

本文采用WRF-Chem v3.9.1.1模式对研究时段的生物质燃烧排放气溶胶的辐射效应进行模拟。WRF-Chem模式为NCAR开发的天气和化学耦合的模式(Grell et al, 2005)。该模式可以模拟气溶胶和气态排放物的大气物理和化学过程,同时可以模拟气溶胶对辐射和云的反馈作用,被广泛应用于气溶胶反馈作用模拟研究(Huang et al, 2016; 杨桃进等, 2017; 刘琳等, 2018)。本文模式的初边界条件使

用的是分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 NCEP 全球再分析资料 FNL, 再分析资料每 6 h 输入一次。模式部分物理过程参数化方案选取 Goddard 短波辐射方案、RRTM 长波辐射方案、YSU 边界层参数化方案、Lin et al(1983) 云微物理方案, 以及新 Grell 积云对流方案。气相化学机制选用 CBMZ 机制, 气溶胶过程选用 MOSAIC 4 档气溶胶模型。一些研究表明, 在高污染情况下, 尤其是生物质燃烧气溶胶存在的情况下, 气溶胶-辐射相互作用远大于气溶胶-云相互作用 (Huang et al, 2016; Fan et al, 2015), 本模拟过程只考虑气溶胶-辐射相互作用。本文中的对流降水量为模式中积云参数化方案产生的次网格尺度降水量, 非对流降水量为模式中云微物理方案产生的网格尺度的降水量。

本文模拟范围包含东南亚地区和中国南方地区 (图 1), 模式分辨率为 9 km。WRF-Chem 模式无反馈条件下模拟的气象场为 CAMx 模式提供气象驱动。采用的人为排放源清单中国部分为清华大学 MEIC 2016 年污染源清单 (<http://www.meicmodel.org>), 东南亚地区人为排放源清单为清华大学 MIX 清单 (Li et al, 2017); 生物质开放燃烧排放清单为 FINN 清单 (Wiedinmyer et al, 2010)。

2 结果与讨论

2.1 东南亚中南半岛生物质排放时空分布特征

由于对我国西南地区春季霾天气影响比较大的

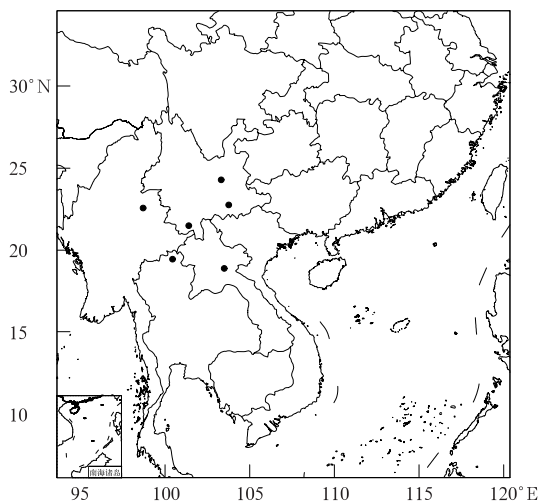


图 1 模拟区域和空气质量站点分布

Fig. 1 Model domain and the locations of air quality monitoring stations

东南亚地区的生物质燃烧主要集中于中南半岛国家 (张玉洽等, 2016; Liang et al, 2019), 本文主要针对中南半岛国家生物质燃烧特征进行分析。图 2 为东南亚中南半岛 2020 年 3—4 月火点累积分布。从火点分布来看, 中南半岛火点主要分布在缅甸西部和东部、老挝北部、泰国西北部, 此外印度东北部地区也存在大量的火点分布。距离我国较近的火点分布区域主要集中在缅甸东部和老挝北部, 这部分区域的黑碳排放速率也大于其他地区, 其中老挝北部部分火点的黑碳排放量超过 $4000 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 。火点分布和黑碳排放分布与张玉洽等 (2016) 对 2013 年的分析基本一致。

图 3 为 2016—2020 年东南亚中南半岛国家生物质开放燃烧黑碳排放量的变化。整体来看, 每年 1—2 月东南亚地区存在少量的生物质开放燃烧; 自 3 月上中旬开始出现大范围的生物质开放燃烧, 黑碳排放量增长至 2 月的 5 倍以上; 3 月末至 4 月上旬生物质开放燃烧黑碳排放量达到峰值; 4 月下旬至 5 月上旬生物质开放燃烧基本结束, 黑碳排放量降至 2 月水平, 5 月之后生物质开放燃烧排放量趋于零值。从 2016—2020 年的排放量变化来看, 生物质燃烧黑碳排放量和峰值都呈逐年增加趋势。从峰值发生的时间来看, 2016—2018 年, 生物质开放燃烧的峰值发生在 4 月上旬, 2019 年和 2020 年生物质开放燃烧排放的峰值发生在 3 月中下旬, 生物质开放燃烧活动呈现提前的趋势。

受生物质开放燃烧的影响, 中南半岛国家部分城市在 3—4 月空气质量明显变差。图 4 为中南半岛北部部分城市 2020 年 3—4 月的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度日均变化。泰国清莱自 3 月上旬开始 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度开始逐步上升, 至 3 月 15 日日均 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度超过 $300 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。老挝北部城市日均 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度也在 3 月 15 日达到峰值, 超过 $450 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。缅甸北部站点 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度也在 3 月上旬出现明显升高, 但是由于站点距离火点区域较远, 浓度低于泰国和老挝监测站点浓度。

我国云南省大部分城市 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度在 3 月中下旬至 4 月上旬都出现了不同程度升高的现象 (图 5)。云南南部城市污染程度明显高于西部和北部的城市。西双版纳和红河州出现了持续的中度以上污染, 其他城市 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度也出现了升高, 空气质量以良为主。西双版纳和红河州 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度随着泰国和老挝北部城市浓度的升高而升高, 但

是两地 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的峰值出现在 3 月末至 4 月初,晚于泰国和老挝北部城市站点,同时污染物峰值浓度明显低于泰国和老挝站点。

2.2 对我国西南地区霾天气影响特征

由于东南亚地区生物质燃烧气溶胶主要影响我国云南地区(张玉洽等,2016),本文选取受影响较大的西双版纳、红河州蒙自和位置较偏北的昆明,对东南亚生物质燃烧气溶胶的影响进行分析。本文利用地面观测和数值模式(CAMx)模拟结合的方式进行分析。表1的统计结果表明,CAMx模式可以较好

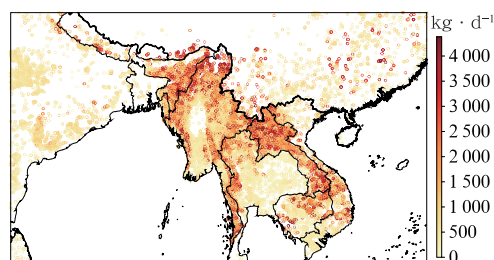


图2 2020年3—4月东南亚地区
火点(红点)及黑碳排放量(填色)分布
Fig. 2 Fire points (red dots) and black carbon
emissions (colored) from March to April 2020

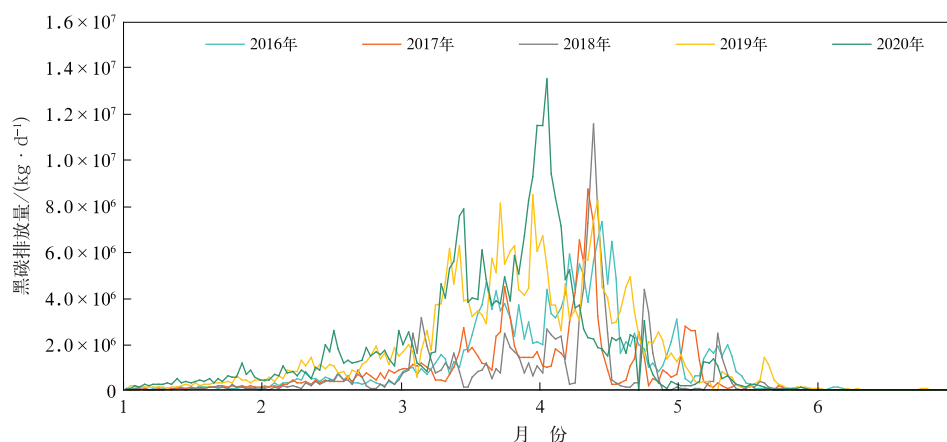


图3 2016—2020年东南亚中南半岛国家上半年
生物质燃烧排放黑碳总量变化

Fig. 3 Black carbon emission trends from biomass burning in
Indochina Peninsula in first half of the year from 2016 to 2020

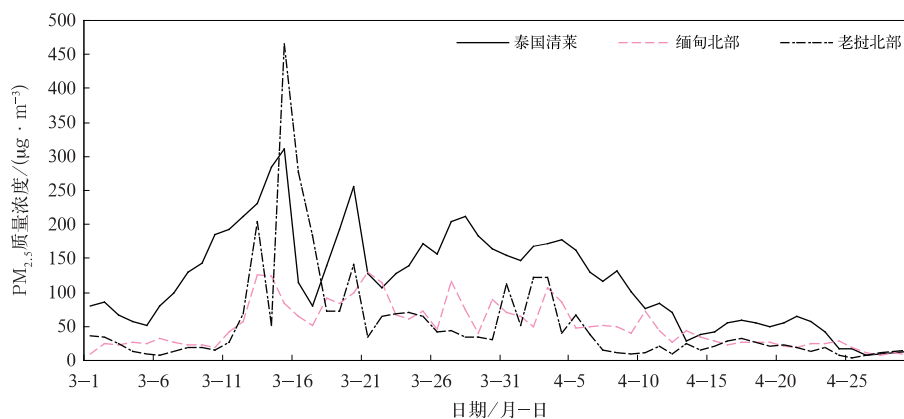


图4 2020年3—4月泰国清莱、缅甸北部、老挝
北部日均 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的变化

Fig. 4 Daily mean $\text{PM}_{2.5}$ mass concentrations of Chiang Rai (Thailand),
a city in North Burma and a city in North Laos from March to April 2020

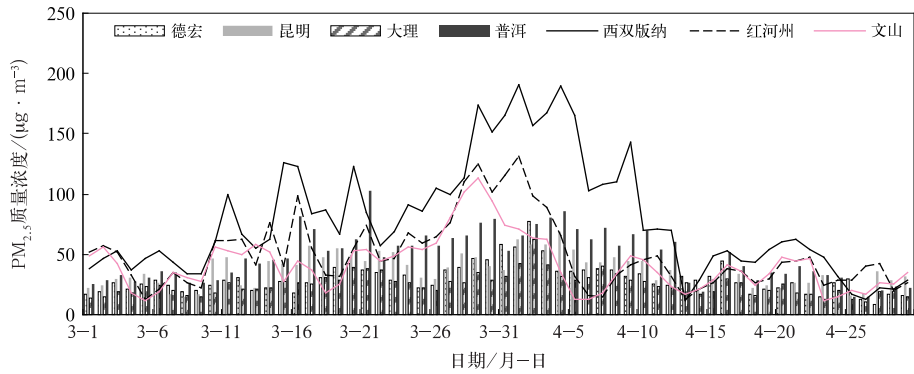


图 5 2020 年 3—4 月中国云南省部分城市日均 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度变化
Fig. 5 Daily mean $\text{PM}_{2.5}$ mass concentrations of some cities in Yunnan Province, China from March to April 2020

表 1 不同城市 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度模拟值、观测值及相关统计参数

Table 1 Statistical parameters of modeled and observed $\text{PM}_{2.5}$ mass concentrations in different cities					
站点	观测值/ $(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	模拟值/ $(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	偏差/ $(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	均方根误差/ $(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	相关系数
昆明	47.8	48.8	1.0	12.6	0.51
西双版纳	117.6	113.5	-4.1	29.2	0.70
红河州	67.4	82.8	15.4	32.2	0.74
泰国清莱	158.7	157.7	-1.0	39.8	0.53
老挝北部	58.1	67.9	9.8	42.5	0.46
缅甸北部	72.9	68.3	-4.6	36.7	0.42

地模拟 3 月下旬至 4 月上旬我国云南省三个城市和东南亚中南半岛部分城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度变化。

图 6 为 3 月 29 日至 4 月 3 日云南三个城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度、能见度和风场变化。西双版纳 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度较高,能见度较低,峰值超过 $250 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。西双版纳地面风速较小,但是 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度对风向变化较为敏感,当风向转为南风或者北风,且风速增加时, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度明显下降;当风速维持较小的水平, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度维持;当风向转为偏西风时, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度快速升高。红河州 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度和能见度的波动较大,对地面风向的变化较为敏感,其地面风以偏南风为主,偏南风时 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度呈现维持的状态;当偏南风转为东南风时, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度呈现快速增加趋势;当风向转为偏东风时, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度迅速下降。昆明 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度较低,能见度较高,未发生明显的霾天气过程;但是在 4 月 1—2 日 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度出现了明显的升高,与风向的关系不大。三地 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的变化趋势没有呈现较好的一致性,与地面风场的关系也呈现较大的差异,表明东南亚地区生物质燃烧排放产生的 $\text{PM}_{2.5}$ 对三地的影响路径存在较大差异。

基于 CAMx 模式模拟的云南三个城市上空

$\text{PM}_{2.5}$ 来源(图 7)也存在差异。西双版纳 $\text{PM}_{2.5}$ 主要来自于缅甸(50%~60%)和本地排放(30%~40%),在特定气象条件下老挝(10%左右)、泰国(3%左右)和印度(10%左右)对西双版纳也有一定的贡献。红河州 $\text{PM}_{2.5}$ 来源主要有缅甸(20%~30%)、老挝(30%~50%)、越南(20%左右)和本地排放(10%左右),此外泰国在特定条件下对红河州有不到 10% 的贡献。昆明 $\text{PM}_{2.5}$ 来源主要有缅甸(30%~40%)和本地排放(50%~60%),印度在一定条件下对昆明有 10% 左右的贡献。

在三地的 $\text{PM}_{2.5}$ 来源中缅甸都占有较大比例,因此缅甸的生物质燃烧的排放是三地霾天气预报的关注重点。由于三地地理位置的不同,中南半岛其他国家的贡献随气象条件的变化存在差异。西双版纳污染物主要受缅甸排放影响。缅甸地区产生的污染物在偏西风作用下,经西双版纳西南部山谷,传输至景洪的观测站点。红河州邻近越南和老挝,在偏东南风作用下污染物沿红河河谷传输至蒙自观测站点。昆明虽然地面的风向变化不大,但是上空的风向和污染物浓度存在明显的变化(图 8),昆明上空风转为偏西南风的情况下,缅甸和印度的污染物传输至昆明上空,进而影响昆明地面的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度。

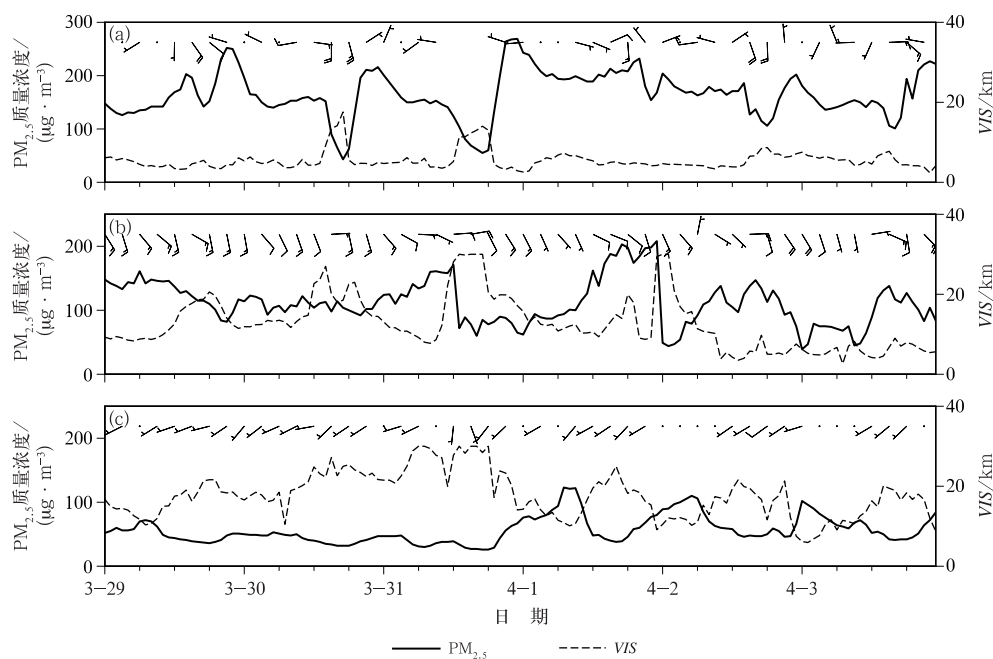
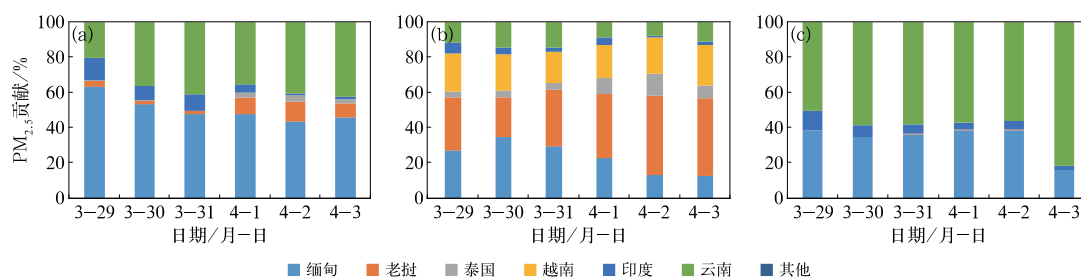
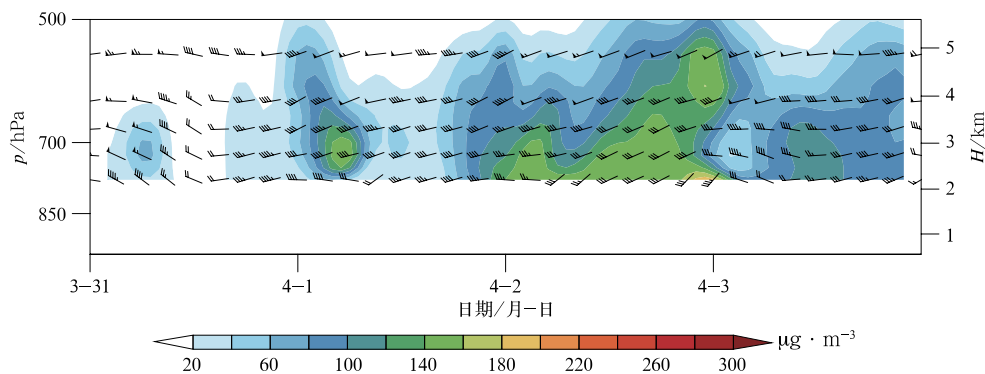


图6 2020年3月29日至4月3日西双版纳(a),红河州(b),昆明(c)

PM_{2.5}质量浓度、能见度和风场的变化Fig. 6 Temporal variations of PM_{2.5} mass concentration, visibility and 10 m wind in Xishuangbanna (a), Honghezhou (b) and Kunming (c) from 29 March to 3 April 2020图7 2020年3月29日至4月3日西双版纳(a),红河州(b),昆明(c)PM_{2.5}来源变化Fig. 7 Source apportionment of PM_{2.5} in Xishuangbanna (a), Honghezhou (b), and Kunming (c) from 29 March to 3 April 2020图8 2020年3月31日至4月3日昆明上空PM_{2.5}质量浓度和风场垂直分布变化Fig. 8 Vertical profile of PM_{2.5} mass concentrations and wind over Kunming from 31 March to 3 April 2020

选取三地均受到明显影响的 4 月 1 日 18 时地面和 700 hPa 高度上的风场和生物质燃烧排放产生的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度分布(图 9), 分析东南亚地区生物质燃烧气溶胶的传输形式。缅甸、老挝、泰国北部地面受偏南风影响, $\text{PM}_{2.5}$ 累积在我国云南与缅甸、老挝交界的地区。由于云南中北部地区相对于南部边境区域海拔较高, 北部地面 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度受东南亚生物质燃烧排放影响不大, 低于 $50 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。在 700 hPa 高度上中南半岛北部区域受西南风控制, 存在低空西南急流, 生物质排放产生的 $\text{PM}_{2.5}$ 影响范围大于地面的范围, 影响范围覆盖了我国华南、江南大部区域。云南大部上空 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度超过 $50 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 我国华南地区上空 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度达到 $200 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 影响明显强于地面。图 10 为沿

25°N 华南地区上空 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的垂直剖面分布。华南地区上空 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度主要分布在 800 ~ 600 hPa 高度, 结果与 Shan et al (2016) 利用 CALIOP 卫星观测结果和 Yang et al (2018) 利用飞机航测结果分析认为中南半岛生物质燃烧主要输送高度在 2~5 km 相符合。Liang et al (2019) 指出东南亚生物质燃烧排放的黑碳在西南风作用下对香格里拉的影响有限, 但是可以传输至我国华南区域。张玉洽等(2016)分析认为, 东南亚生物质排放的污染物对广州的 $\text{PM}_{2.5}$ 贡献日均值低于 $2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。本文分析可以发现东南亚地区生物质燃烧排放气溶胶对于我国华南地区 $\text{PM}_{2.5}$ 贡献较小, 但是对华南地区上空 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度有较大影响。可以较好解释 Liang et al (2019) 和张玉洽等(2016)的研究结果。

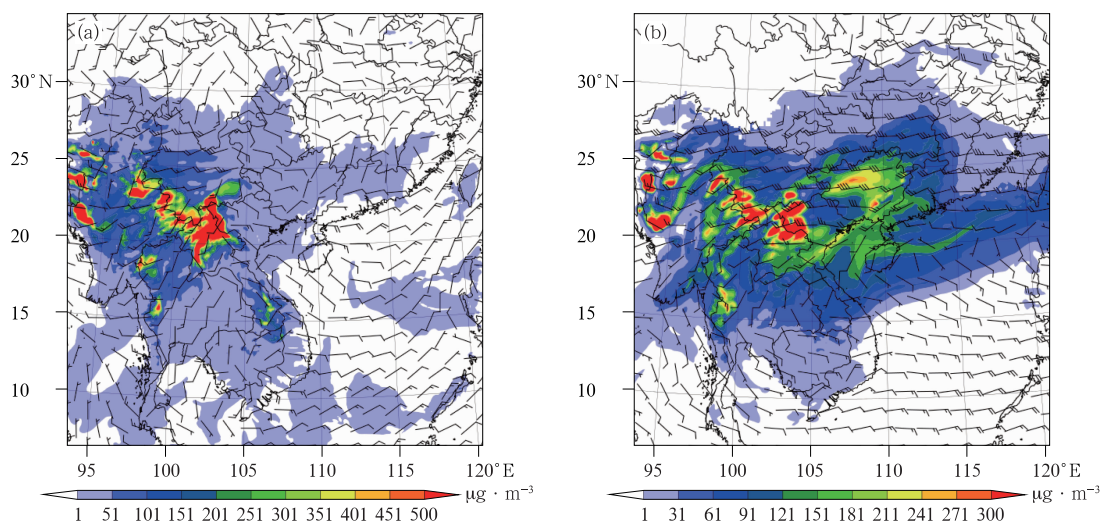


图 9 2020 年 4 月 1 日 18 时地面(a)和 700 hPa(b)风场和生物质燃烧排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度分布

Fig. 9 Distribution of $\text{PM}_{2.5}$ mass concentrations and wind field at the surface (a) and 700 hPa (b) at 18:00 BT 1 April 2020

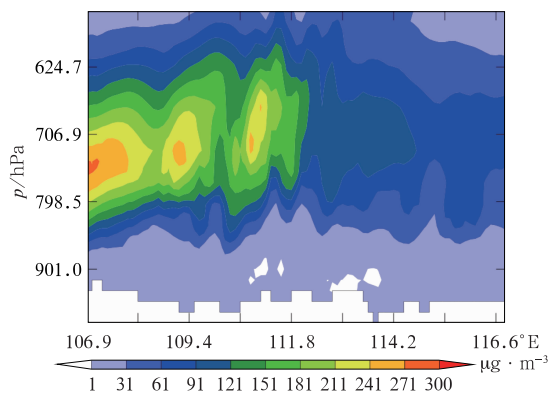


图 10 2020 年 4 月 1 日 18 时沿 25°N 剖面的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度垂直分布

Fig. 10 Longitude-height crossing 25°N of $\text{PM}_{2.5}$ mass concentrations at 18:00 BT 1 April 2020

2.3 对我国南方地区前汛期降水影响

由于东南亚地区生物质燃烧气溶胶可以传输至我国华南区域上空, 因此本文利用 WRF-Chem 模式分析了东南亚地区生物质燃烧气溶胶对华南地区前汛期一次降水过程的影响。本文选取 2020 年 4 月 2—3 日的降水过程进行模拟分析。本次降水系统主要位于副热带高压北侧, 850 hPa 高度低空切变线位于江南南部至华南北部一带, 切变线南侧西南急流为江南华南地区提供了较好的水汽条件。受此影响, 本次过程中江南南部、华南部分地区出现大到暴雨, 湖南和江西南部、广东北部等地出现大暴雨(图 11a)(关良等, 2020)。

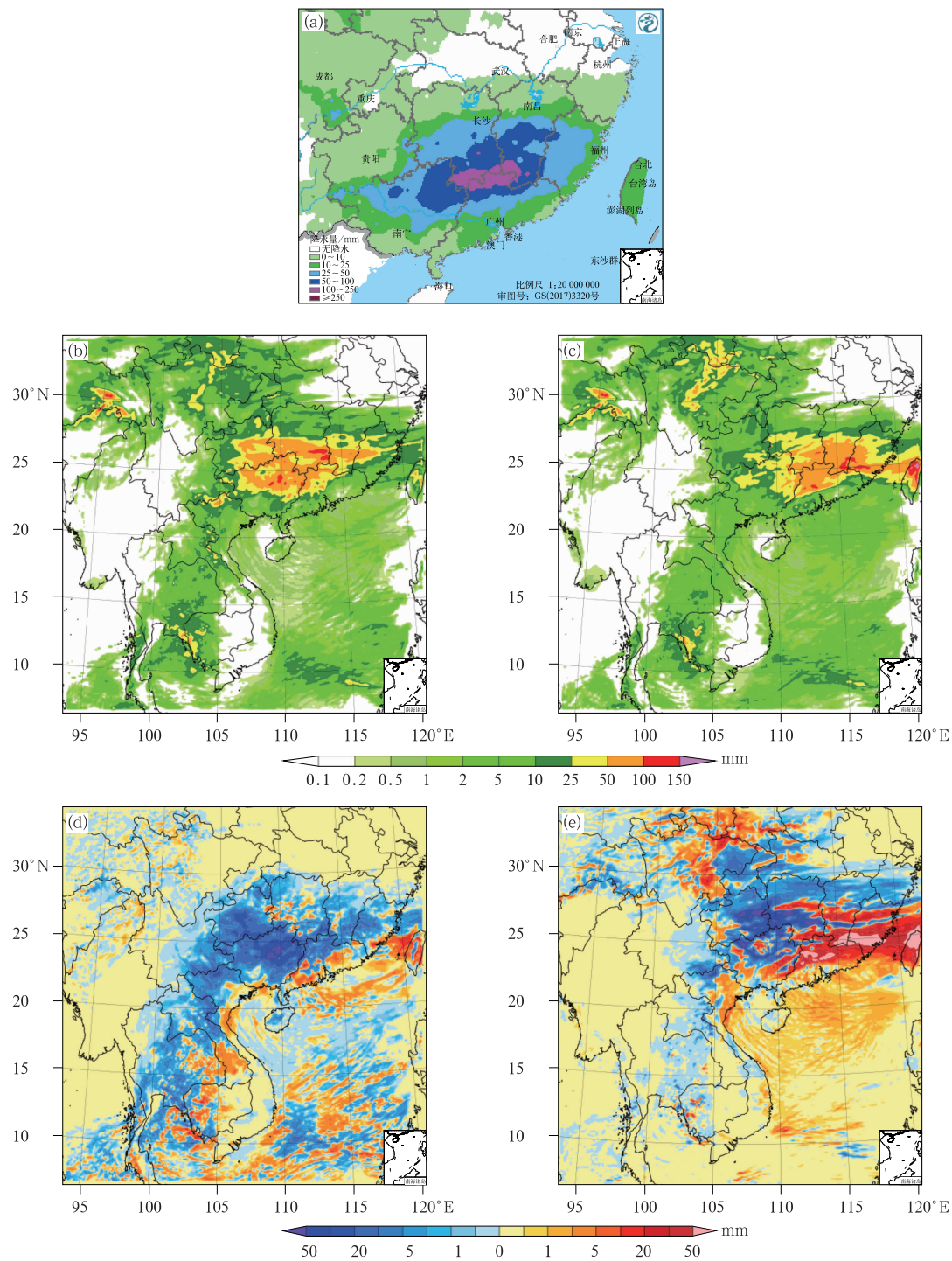


图 11 2020 年 4 月 2—3 日累计降水量实况(a), 无反馈模拟(b)、有反馈模拟(c)分布, 以及有反馈与无反馈模拟的对流降水(d)和非对流降水(e)累计差值分布

Fig. 11 Observed precipitation (a) and modeled precipitations excluding (b) and considering (c) radiative effects of aerosols, differences of modeled convective (d) and non-convective (e) precipitations between excluding and considering radiative effects of aerosols from 2 to 3 April 2020

模式模拟的降水分布(图 11b 和 11c)与实况基本一致, 但是无反馈模拟和有反馈模拟存在一定的

差异。两种情况下模式模拟的大到暴雨区域主要为江南南部和华南北部区域, 与实况较为一致, 但是对

100 mm 以上降水区域模拟较实况均存在漏报。两种情况下模拟的差异主要体现在对大到暴雨区域预报的位置上。无反馈模拟的大到暴雨区域(图 11b)更偏西,贵州南部、广西北部降水超过了 50 mm,湖南和江西南部、广东北部区域降水存在小于 50 mm 的区域,与实况中 100 mm 强降水区域存在较大的差异。有反馈模拟(图 11c)的大到暴雨区域与实况更接近,贵州南部、湖南东南部、广西北部降水强度较无反馈明显减少,湖南和江西南部、广东北部区域降水强度明显增强。但是有反馈模拟对福建、台湾等地的降水存在高估。

对比模式模拟对流降水和非对流降水分布的差异(图 11d 和 11e)可以看出,有反馈模拟可以减弱降水区域的对流降水,增强切变线南侧的非对流降水。有反馈条件下,在贵州、广西、广东北部等地的对流性降水明显弱于无反馈模拟,同时中南半岛主要生物质燃烧发生区域对流性降水也存在明显的减弱;在切变线附近及南侧的强降水区域,有反馈模拟的非对流性降水明显强于无反馈模拟。有反馈条件下对于贵州、广西等地对流降水的抑制,以及对湖南和江西南部、广东北部非对流降水的增强,使有反馈模拟降水分布与实况更接近。

为进一步分析有反馈模拟对对流降水的抑制和非对流降水的增强作用,选取 4 月 2 日 18 时降水较强时段,对有反馈模拟和无反馈模拟的大气环境场的差异进行分析。图 12a 为沿 25°N 主要降雨带(107°~117°E)垂直剖面上有反馈和无反馈模拟的温度差异垂直分布。有反馈模拟相对于无反馈模拟的 800 hPa 高度以上的高空温度明显升高,近地面及低空的温度明显降低。生物质燃烧气溶胶对于近地面及低空温度冷却作用及对于高空的增温作用,会导致大气层结更稳定,从而抑制对流活动的产生(Huang et al, 2016; Lee et al, 2014)。本文模拟生物质燃烧气溶胶对于对流降水的影响与其他关于棕色云对降水影响机制一致(Chung and Ramanathan, 2006)。图 12b 为 850 hPa 高度水汽含量差值分布。有反馈模拟相对于无反馈模拟在切变线南侧高空急流位置的水汽浓度明显增高,表明生物质燃烧气溶胶的反馈作用可以产生更强的水汽输送,导致切变线附近及南侧非对流性降水明显增强。水汽输送增强可能是因为本地对流性降水的减弱,使得更多的水汽可以被输送到下风向区域(Huang et al, 2016; Lee et al, 2014)。对流性降水减弱和非对流性降水

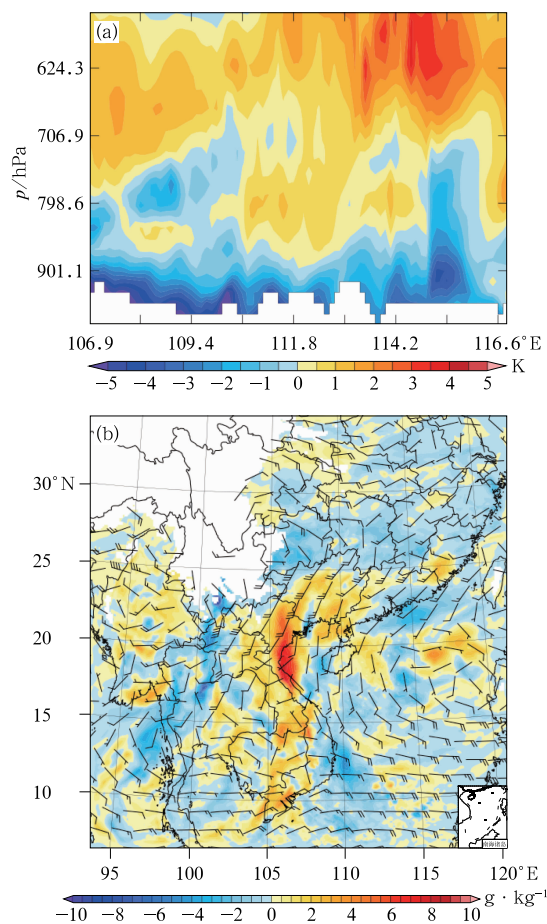


图 12 2020 年 4 月 2 日 18 时有反馈和无反馈模拟的沿 25°N 剖面温度差值(a)和 850 hPa 高度水汽含量差值(b)

Fig. 12 Longitude-height crossing 25°N of temperature changes (a) and water vapor changes (b) at 850 hPa induced by aerosol at 18:00 BT 2 April 2020

增强的共同作用,导致有反馈模拟的本次降水量没有显著少于无反馈的模拟。本次过程模拟结果与 Lee et al(2014)对整个前汛期降水模拟降低 40% 的结果不同。因此,生物质燃烧气溶胶会影响本次降水过程的强降水分布,使降水更集中于切变线附近,但是并不一定会减少过程降水累积量。

3 结 论

本文利用 FINN 清单分析了东南亚中南半岛生物质燃烧气溶胶排放的时空特征,利用东南亚和我国部分地面站点观测数据及数值模式分析了中南半岛生物质燃烧气溶胶排放对我国西南地区霾天气影

响的特征,利用数值模式分析了中南半岛生物质燃烧气溶胶对我国南方地区前汛期降水过程的影响特征。结果表明:

(1)东南亚中南半岛生物质燃烧气溶胶排放主要发生在每年的3—4月,峰值主要出现在3月下旬至4月上旬,且峰值出现时间近几年呈现提前趋势。距离我国较近的排放区域主要分布在缅甸东部和老挝北部。

(2)中南半岛生物质燃烧气溶胶主要影响我国云南南部城市PM_{2.5}浓度和霾天气的发生。缅甸生物质燃烧排放气溶胶是最大的气溶胶贡献源。但是不同的城市受地理位置和气象条件影响,在气溶胶来源上存在差异。云南红河州蒙自同时会受到老挝和越南北部生物质燃烧的影响,昆明等中部城市同时受到印度东北部的生物质燃烧的影响。

(3)中南半岛生物质燃烧气溶胶在低空西南急流作用下,可以由800~600 hPa高度传输至我国华南、江南大部分地区的上空。

(4)中南半岛生物质燃烧气溶胶输送至华南上空使高空温度升高,近地层温度降低,增加大气稳定性,从而抑制对流性降水。低空西南急流将更多的水汽输送至切变线南侧,增强非对流性降水。对于本次华南前汛期降水过程,中南半岛生物质燃烧气溶胶可以改变降水过程中的降水分布,使降水更集中于切变线附近。

参考文献

- 陈涛,陈博宇,于超,等,2020.华南前汛期锋面对流系统和暖区对流系统的多尺度特征和集合预报敏感性对比分析[J].气象,46(9):1129-1142. Chen T, Chen B Y, Yu C, et al, 2020. Analysis of multiscale features and ensemble forecast sensitivity for MCSs in front-zone and warm sector during pre-summer rainy season in South China[J]. Meteor Mon, 46(9):1129-1142 (in Chinese).
- 关良,张涛,刘自牧,2020.2020年4月大气环流和天气分析[J].气象,46(7):994-1000. Guan L, Zhang T, Liu Z M, 2020. Analysis of the April 2020 atmospheric circulation and weather[J]. Meteor Mon, 46(7):994-1000 (in Chinese).
- 胡宁,符娇兰,汪会,2020.华南前汛期强降雨个例模式降水预报误差成因初探[J].气象,46(8):1026-1038. Hu N, Fu J L, Wang H, 2020. Analysis of the source of model precipitation prediction bias for a heavy rainfall event in the pre-flood season in South China[J]. Meteor Mon, 46(8):1026-1038 (in Chinese).
- 刘琳,白永清,林春泽,等,2018.华中区域空气质量数值预报系统评估及气溶胶辐射效应的模拟研究[J].气象,44(9):1179-1190. Liu L, Bai Y Q, Lin C Z, et al, 2018. Evaluation of regional air quality numerical forecasting system in Central China and its application for aerosol radiative effect[J]. Meteor Mon, 44(9):1179-1190 (in Chinese).
- 石荣光,刘奇俊,马占山,2015.利用GRAPES模式研究气溶胶对云和降水过程的影响[J].气象,41(3):272-285. Shi R G, Liu Q J, Ma Z S, 2015. Numerical simulation of aerosol effects on cloud and precipitation using GRAPES model[J]. Meteor Mon, 41(3):272-285 (in Chinese).
- 王继康,花丛,桂海林,等,2017.2016年1月我国中东部一次大气污染物传输过程分析[J].气象,43(7):804-812. Wang J K, Hua C, Gui H L, et al, 2017. Transport of PM_{2.5} of the haze pollution episode over mid-eastern China in January 2016[J]. Meteor Mon, 43(7):804-812 (in Chinese).
- 闫才青,郑玫,张远航,2014.大气棕色碳的研究进展与方向[J].环境科学,35(11):4404-4414. Min C Q, Zheng M, Zhang Y H, 2014. Research progress and direction of atmospheric brown carbon[J]. Environ Sci, 35(11):4404-4414 (in Chinese).
- 杨桃进,刘宇迪,睦敏,2017.不同浓度污染气溶胶对一次暴雨的影响[J].大气科学,41(4):882-896. Yang T J, Liu Y D, Sui M, 2017. Impacts of different concentrations of anthropogenic pollutants on a rainstorm[J]. Chin J Atmos Sci, 41(4):882-896 (in Chinese).
- 张玉洽,杨迎春,李杰,等,2016.东南亚生物质燃烧对我国春季PM_{2.5}质量浓度影响的数值模拟[J].环境科学研究,29(7):952-962. Zhang Y Q, Yang Y C, Li J, et al, 2016. Modeling the impacts of biomass burning in Southeast Asia on PM_{2.5} over China in spring[J]. Res Environ Sci, 29(7):952-962 (in Chinese).
- Bergamaschi P, Hein R, Heimann M, et al, 2000. Inverse modeling of the global CO cycle: 1. Inversion of CO mixing ratios[J]. J Geophys Res Atmos, 105(D2):1909-1927.
- Bo X, Xue X D, Xu J, et al, 2019. Aviation's emissions and contribution to the air quality in China[J]. Atmos Environ, 201:121-131.
- Bond T C, Doherty S J, Fahey D W, et al, 2013. Bounding the role of black carbon in the climate system: a scientific assessment[J]. J Geophys Res Atmos, 118(11):5380-5552.
- Chung C E, Ramanathan V, 2006. Weakening of North Indian SST Gradients and the monsoon rainfall in India and the Sahel[J]. J Climate, 19(10):2036-2045.
- ENVIRON, 2015. User's guide: comprehensive air quality model with extensions Version 6.2 [EB/OL]. [2015-03-01] http://www.camx.com/files/camxusersguide_vb_20.pdf.
- Fan J W, Rosenfeld D, Yang Y, et al, 2015. Substantial contribution of anthropogenic air pollution to catastrophic floods in Southwest China[J]. Geophys Res Lett, 42(14):6066-6075.
- Fang C W, Zhu B, Pan C, et al, 2020. Regional and sectoral sources for black carbon over South China in spring and their sensitivity to East Asian summer monsoon onset[J]. J Geophys Res Atmos, 125(20):e2020JD033219.
- Grell G A, Peckham S E, Schmitz R, et al, 2005. Fully coupled "online" chemistry within the WRF model[J]. Atmos Environ, 39

- (37):6957-6975.
- Hu J L, Chen J J, Ying Q, et al, 2016. One-year simulation of ozone and particulate matter in China using WRF/CMAQ modeling system[J]. *Atmos Chem Phys*, 16(16):10333-10350.
- Huang K, Fu J S, Hsu N C, et al, 2013. Impact assessment of biomass burning on air quality in Southeast and East Asia during BASE-ASIA[J]. *Atmos Environ*, 78:291-302.
- Huang X, Ding A J, Liu L X, et al, 2016. Effects of aerosol-radiation interaction on precipitation during biomass-burning season in East China[J]. *Atmos Chem Phys*, 16(15):10063-10082.
- Itahashi S, Yamaji K, Chatani S, et al, 2018. Model performance differences in sulfate aerosol in winter over Japan based on regional chemical transport models of CMAQ and CAMx[J]. *Atmosphere*, 9(12):448.
- Ito A, Ito A, Akimoto H, 2007. Seasonal and interannual variations in CO and BC emissions from open biomass burning in Southern Africa during 1998-2005[J]. *Global Biogeochem Cycles*, 21(2):GB2011.
- Jiang X Y, Wiedinmyer C, Carlton A G, 2012. Aerosols from fires: an examination of the effects on ozone photochemistry in the western United States[J]. *Environ Sci Technol*, 46(21):11878-11886.
- Kolusu S R, Marsham J H, Mulcahy J, et al, 2015. Impacts of Amazonia biomass burning aerosols assessed from short-range weather forecasts[J]. *Atmos Chem Phys*, 15(21):12251-12266.
- Lee D, Sud Y C, Oreopoulos L, et al 2014. Modeling the influences of aerosols on pre-monsoon circulation and rainfall over Southeast Asia[J]. *Atmos Chem Phys*, 14(13):6853-6866.
- Li M, Zhang Q, Kurokawa J I, et al, 2017. MIX: a mosaic Asian anthropogenic emission inventory under the international collaboration framework of the MICS-Asia and HTAP[J]. *Atmos Chem Phys*, 17(2):935-963.
- Liang Y, Che H, Gui K, et al, 2019. Impact of biomass burning in south and southeast Asia on background aerosol in Southwest China[J]. *Aerosol Air Qual Res*, 19(5):1188-1204.
- Lin Y L, Farley R D, Orville H D, 1983. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model[J]. *J Appl Meteor*, 22(6):1065-1092.
- Liu H Y, Jacob D J, Bey I, 2003. Transport pathways for Asian pollution outflow over the Pacific: interannual and seasonal variations[J]. *J Geophys Res Atmos*, 108(D20):8786.
- Shan X L, Xu J, Li Y X, et al, 2016. Analysis of the origin of peak aerosol optical depth in springtime over the Gulf of Tonkin[J]. *J Environ Sci*, 40:129-137.
- Wiedinmyer C, Akagi S K, Yokelson R J, et al, 2010. The Fire INventory from NCAR (FINN): a high resolution global model to estimate the emissions from open burning[J]. *Geosci Model Dev*, 4(3):625-641.
- Wilcox E M, 2012. Direct and semi-direct radiative forcing of smoke aerosols over clouds[J]. *Atmos Chem Phys*, 12(1):139-149.
- Xue L, Ding A J, Cooper O, et al, 2020. ENSO and Southeast Asian biomass burning modulate subtropical trans-Pacific ozone transport[J]. *Nat Sci Rev*, nwaal32. DOI:10.1093/nsr/nwaal32.
- Yang X Y, Xu J, Bi F, et al, 2018. Aircraft measurement over the Gulf of Tonkin capturing aloft transport of biomass burning[J]. *Atmos Environ*, 182:41-50.