

徐敬, 寇星霞, 李梓铭. 2018. 秸秆燃烧排放对北京及其周边地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度影响的数值模拟 [J]. 气候与环境研究, 23 (5): 587–595. Xu Jing, Kou Xingxia, Li Ziming. 2018. Modeling the impact of emissions from crop residue burning on PM<sub>2.5</sub> concentration in Beijing and its surrounding areas [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23 (5): 587–595, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17171.

# 秸秆燃烧排放对北京及其周边地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度影响的数值模拟

徐敬<sup>1</sup> 寇星霞<sup>1</sup> 李梓铭<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

<sup>2</sup> 京津冀环境气象预报预警中心, 北京 100089

**摘要** 采用卫星监测的火点燃烧排放数据, 利用区域化学传输模式 WRF-Chem 模拟分析了 2017 年 5 月华北地区细颗粒物 (PM<sub>2.5</sub>) 质量浓度分布, 通过生物质燃烧排放源 (华北区域以秸秆燃烧为主) 开关的敏感性试验定量计算了燃烧排放对北京及其周边地区 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的影响。卫星监测结果显示, 2017 年 5 月华北地区有大量的秸秆焚烧现象, 对该地区空气质量造成一定影响的燃烧天数为 20 d, 占全月总日数的 65% 左右。数值模拟结果表明: 该地区秸秆燃烧排放导致 PM<sub>2.5</sub> 浓度升高的区域集中在华北平原农作物产区, 其分布位置与卫星监测的火点分布吻合。秸秆燃烧导致这些地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度月平均值上升幅度普遍超过 3 μg/m<sup>3</sup>, 高值区超过了 11 μg/m<sup>3</sup>, 上升比例可达 10% 以上; 此外, 来自华北平原及长三角地区的燃烧排放对北京 (特别是东南部地区) 污染物浓度的影响是不容忽视的, 其中河南、山东、天津等地的秸秆燃烧在合适风场的作用下会严重影响北京, 可导致丰台及通州等地 PM<sub>2.5</sub> 小时浓度上升超过 17 μg/m<sup>3</sup>, 上升幅度超过 40%。

**关键词** 秸秆燃烧 北京 细颗粒物 (PM<sub>2.5</sub>) 数值模拟

文章编号 1006-9585 (2018) 05-0587-09

中图分类号 X513

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17171

## Modeling the Impact of Emissions from Crop Residue Burning on PM<sub>2.5</sub> Concentration in Beijing and Its Surrounding Areas

XU Jing<sup>1</sup>, KOU Xingxia<sup>1</sup>, and LI Ziming<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089

<sup>2</sup> Environmental Meteorology Forecast Center of Beijing-Tianjin-Hebei, Beijing 100089

**Abstract** Open biomass burning is an important source of air pollution in North China. The contribution of biomass burning to Beijing and its surrounding areas is quantified using a three-dimensional regional chemical transport model (WRF-Chem) with satellite-detected fire emissions inventory in May 2017 as input. It is found that there were 20 days with dense fires in North China during this month, which exerted great impact on regional air quality. Simulated results show that the biomass burning resulted in PM<sub>2.5</sub> concentration increase mainly over major crop production areas in the North China Plain, which are consistent with the distribution of satellite-detected fire spots. Estimation based on model

收稿日期 2017-12-05; 网络预出版日期 2018-05-03

作者简介 徐敬, 女, 1977 年出生, 博士, 副研究员, 主要研究方向为大气化学。E-mail: jxu@ium.cn

通讯作者 寇星霞, E-mail: xxkou@ium.cn

资助项目 国家重点研发计划项目 2016YFC0202100, 国家自然科学基金项目 41505110

**Funded by** National Key Research and Development Program of China (Grant 2016YFC0202100), National Natural Science Foundation of China (NSFC, Grant 41505110)

simulation indicates that open biomass burning contributes more than  $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  to monthly averaged  $\text{PM}_{2.5}$  mass concentration over the entire North China with the maximum contribution larger than  $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , which accounts for more than 10% of the  $\text{PM}_{2.5}$  mass concentration in some areas. The simulation also indicates that even if there is almost no fire spot in Beijing and the adjacent areas, biomass burning in the North China Plain and Yangtze River delta can still affect air quality in Beijing through long range transport process. A typical case review suggests that crop residue burning in Henan, Shandong, and Tianjin can significantly affect southeastern portion of Beijing, and leads to  $\text{PM}_{2.5}$  concentration increase by more than  $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , which is equivalent to larger than 40% increase of the  $\text{PM}_{2.5}$  concentration.

**Keywords** Biomass burning, Beijing,  $\text{PM}_{2.5}$ , Numerical simulation

## 1 引言

以森林大火和秸秆焚烧为主的生物质燃烧排放的气溶胶及气态污染物在近地层大气化学、云微物理过程及辐射平衡方面起着重要作用,在全球空气质量、云、大气辐射、水汽循环及区域气候等方面有不可忽视的影响 (Andreae et al., 2005; Huang et al., 2013)。

中国作为农业大国,生物质能源开发利用以及秸秆焚烧处理有利于作物生长等因素导致我国秸秆焚烧量较大 (Yan et al., 2006)。华北平原是我国重要冬小麦和玉米产区,是重要的秸秆燃烧源区,农作物收获季节山东、河南、河北等主要农业大省的焚烧排放不仅影响了当地空气质量,同时也是北京地区颗粒物污染的重要来源,如:源解析方法研究结果显示,生物质燃烧对北京地区颗粒物中有机碳 (OC) 和无机碳 (EC) 的贡献均可达 50% (Cheng et al., 2013); 对细颗粒物 ( $\text{PM}_{2.5}$ ) 质量浓度贡献超过了 10% (Song et al., 2006; Yu et al., 2013; Zhang et al., 2013), 对  $\text{PM}_{2.5}$  中有机组分的贡献接近 20% (方冬青等, 2016)。源解析方法在污染物来源贡献的定量评估中起到了十分重要的作用,但一方面,采用受体模型的源解析方法,就同一区域范围而言,解析结果往往因为采集样品时空代表性的差异呈现较大差别;另一方面,常规的源解析方法仅可对生物质燃烧的一次污染贡献进行定量,其对空气质量影响的全面评价有待进一步研究。

本研究利用区域化学传输模式,将卫星监测的火点燃烧排放数据在模式中进行逐日更新,同时采用排放源开关的敏感性试验方法,针对夏收前后 (2017 年 5 月) 华北平原秸秆燃烧的高发期进行模拟研究,定量计算了秸秆燃烧排放对北京及周边地区  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度的贡献,以期对环境气象模式系统中排放源清单的改进提供参考。

## 2 模式与方法

### 2.1 模式介绍

本研究模式采用在线大气化学模式 WRF-Chemv3.5.1 版本,WRF-Chem 是将化学模块与 WRF 模式 (由 NCAR 及 NOAA 联合一些大学和研究机构开发的中尺度预报模式同化系统) 相耦合,模式中考虑了大气污染物的平流输送、湍流扩散、干湿沉降、辐射传输等主要大气物理过程,以及多相化学、气溶胶演变等大气化学过程。

模式采用的 [主要物理、化学参数化方案参见徐敬等 (2015)] 气相化学过程为 CBMZ 方案 (Zaveri and Peters, 1999), 气溶胶过程采用包含了液相化学反应的 MOSAIC 模型 (Zaveri et al., 2005)。模式采用 Lambert 地图投影方式,水平分辨率为 27 km,中心点经纬度为 (37.5°N, 107.8°E), 经向格点数为 214 个,纬向格点数为 142 个;垂直方向上不均匀地分为 30 层,其中 2 km 以下划分为 13 层,模式层顶设置为 50 hPa。模拟区域 (外框) 及本研究关注区域 (内框) 如图 1 所示。

模拟时段为 2017 年 4 月 24 日至 5 月 31 日,前一周为模式热启动 (Spin-up) 时间段,5 月 1~31 日为本文研究的目标时段,每 1 h 输出一次数据。气象驱动场的初始条件和边界条件采用 NCEP FNL 全球  $1^\circ$  (纬度)  $\times 1^\circ$  (经度) 的再分析资料,时间分辨率为 6 h。文中用于模式检验的  $\text{PM}_{2.5}$  浓度观测数据来自“全国城市空气质量实时发布平台” ([http://106.37.208.233:20035/\[2017-05-01~2017-05-31\]](http://106.37.208.233:20035/[2017-05-01~2017-05-31]))。

### 2.2 排放清单及模拟方法

人为源排放清单采用清华大学主持研发的  $0.25^\circ$  (纬度)  $\times 0.25^\circ$  (经度) MEIC 清单 (Li et al., 2015) ([http://www.acom.ucar.edu/acresp/forecast/fire-emissions.shtml\[2017-06-13\]](http://www.acom.ucar.edu/acresp/forecast/fire-emissions.shtml[2017-06-13])), 该清单范围覆盖了中国大陆地区,包含 5 个排放部门 (电力、工业、民用、交通、

农业), 代表年份为 2012 年, 时间分辨率为月。

生物质燃烧排放清单采用 NACR 发展的 Fire INventory from NCAR (FINNv1.5) (Wiedinmyer et al., 2011)。FINNv1.5 是基于卫星监测的火点及土地覆盖类型制作而成, 包括了森林、农业等生物质燃烧释放的气体和颗粒物, 代表年份为 2013 年。该清单空间分辨率为 1 km, 时间分辨率为 1 d, 较高的时空分辨率可更好地反映生物质燃烧空间分布不均匀、时间变化不规律的特点; 目前 FINNv1.5 排放清单已被多种模式采用 (Martin et al., 2013; Amnuaylojaroen et al., 2014; Nuryanto, 2015)。本研究模拟过程中人为源排放按照月排放量平均分配至日, 生物质燃烧排放量依据卫星监测结果逐日更新; 以下将仅输入人为源排放清单 MEIC 的模拟称为基础情景模拟, 将人为源排放清单 MEIC 和生物质燃烧排放清单 FINN 同时输入的模拟称为生物质燃烧情景模拟, 通过生物质燃烧情景与基础情景的对比, 可以分析得出生物质燃烧排放对北京及周边地区主要污染物浓度的贡献, 本文中我们重点关注燃烧排放对 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的影响。

### 2.3 秸秆燃烧排放分布特征

利用 2017 年 5 月卫星监测的火点分布资料, 将模拟区域内逐日监测到的火点位置叠加显示于图 2a。图中显示, 东南亚地区是生物质燃烧十分集中的地区, 已有研究表明: 东南亚地区生物质燃烧主要影响我国的云南、广西等地 (张玉洽等, 2016), 对这些地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度的贡献甚至高于当地人源排放。此外, 华北平原以及长三角等主要农作物产区也是火点燃烧的集中区域, 相关报道显示: 这些地区麦秸秆及玉米秸秆燃烧会对周边地区空气质量造成较大影响 (傅瑜等, 2015; 宋京京等, 2016), 是秋收季节重霾等污染过程的形成的重要成因 (方冬青等, 2016)。

依据本文关注区域 (图 1 内框) 内逐日火点数的统计结果, 我们可以将 2017 年 5 月秸秆燃烧日的

燃烧情况大致分为 3 种: 没有或极少量火点 (<20 个, 图 2b)、少量火点 (20~100 个, 图 2c)、大量火点 (>100 个, 图 2d), 统计得出该月上述 3 种火点燃烧情况依次出现 11 d、11 d 和 9 d, 分别占全月总日数的 35%、35% 和 30%。

## 3 结果与讨论

### 3.1 模式验证

图 3 为华北区域内典型站点 PM<sub>2.5</sub> 日均浓度模拟值与观测值对比, 模拟值为同时输入基础清单和生物质燃烧排放清单的模拟结果。地面观测记录显示, 5 月 3~5 日、10~11 日分别出现了两次沙尘过程, 通过沙尘模块的开关试验分析得出, 来自上游地区的沙尘传输是导致颗粒物浓度显著上升的主要原因 (图略)。总体来看, WRF-Chem 模式基本再现了不同地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度的时空演变规律, 模拟值及观测值的相关系数基本在 0.68 以上。由表 1 可见, 大部分站点 85% 以上的模拟值/观测值在 0.5~2.0 范围内; 各测点模式偏差均为负偏差, 分布在 -1.30~-14.84 之间, 表明模式对于 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度有系统性低估。导致这种系统性偏差的原因, 除了沙尘过程的影响外, 还有: 一方面, 由于排源清单的极大不确定性带来的模拟偏差; 另一方面, 夏季光化学反应增强, 二次气溶胶组分在颗粒物中所占比例明显增加 (Zhao et al., 2013), 但本研究采用的模式没有考虑二次有机气溶胶形成过程。

### 3.2 PM<sub>2.5</sub> 浓度区域分布特征

图 4 为 2017 年 5 月 PM<sub>2.5</sub> 浓度月均值及平均风场的区域分布。总体来看, 华北地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度呈现东南及南部地区偏高、西北及北部地区偏低的特点, 高值区 PM<sub>2.5</sub> 月浓度普遍高于 30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 其中河南、安徽、江苏、湖北以及重庆等部分地区月

表 1 不同站点 PM<sub>2.5</sub> 浓度模拟值与观测值对比统计

Table 1 Statistics of observed and simulated concentrations of PM<sub>2.5</sub> at major sites

站点	观测平均值/ $\mu\text{g m}^{-3}$	模拟平均值/ $\mu\text{g m}^{-3}$	相关系数	模式偏差/ $\mu\text{g m}^{-3}$	均方根误差	有效观测数据天数	模拟值与观测值之比在
							0.5~2.0 范围的比例
北京	39.43	28.52	0.84	-10.91	13.70	26	0.85
天津	37.26	32.00	0.72	-5.26	10.74	25	0.96
石家庄	55.27	40.43	0.76	-14.84	18.06	24	0.92
济南	39.72	34.99	0.92	-4.73	6.50	25	1.00
太原	36.89	35.59	0.74	-1.30	6.11	25	1.00
郑州	47.49	41.00	0.68	-6.49	11.79	24	0.96

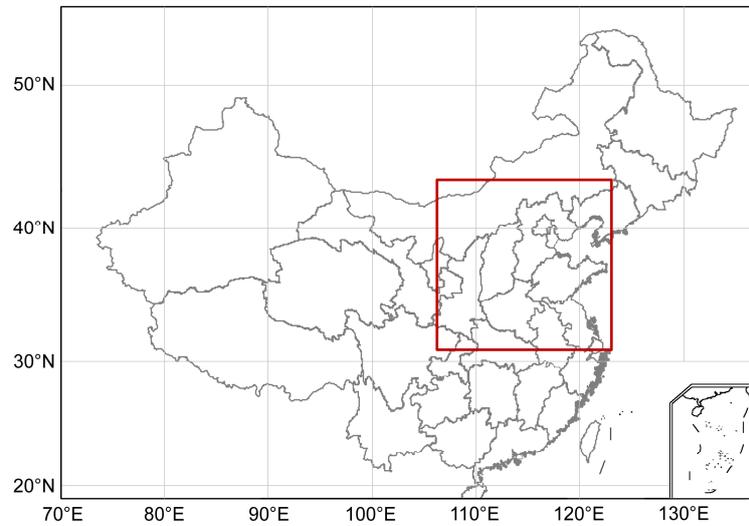


图 1 模拟及关注区域 (内框)

Fig. 1 Model domain and focus area (smaller rectangle) in the present study

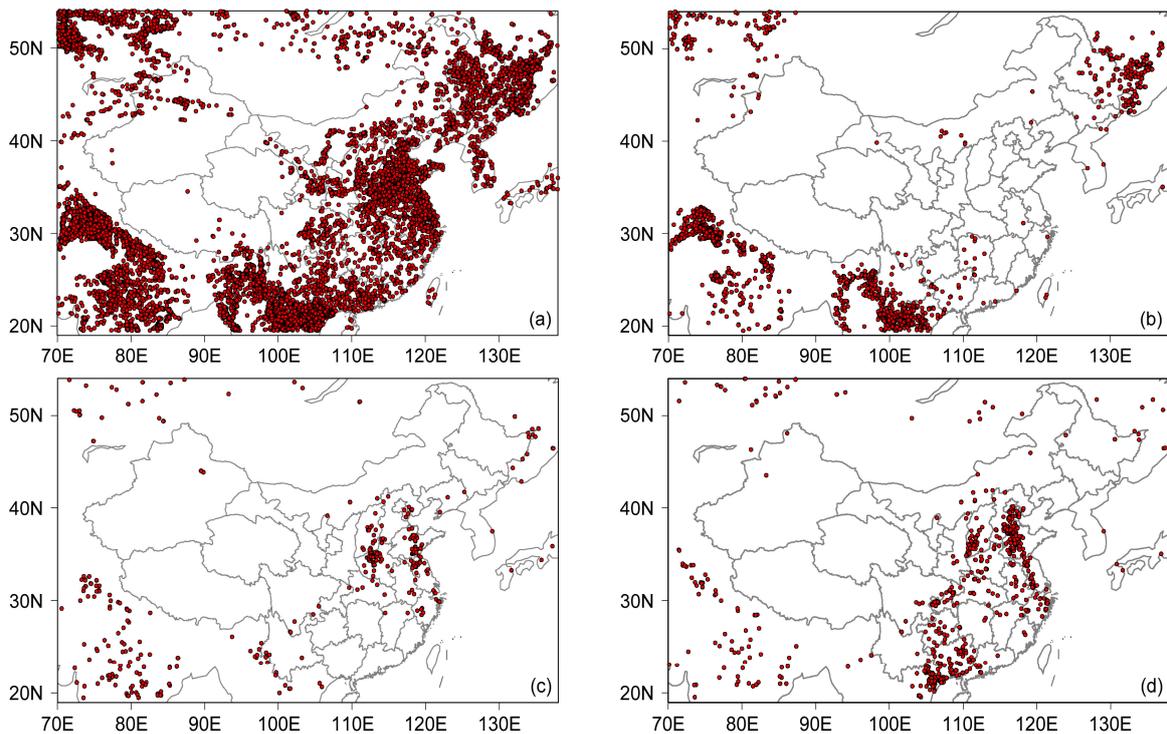


图 2 2017 年 5 月卫星监测模拟区域内火点 (点代表火点位置) 分布情况: (a) 火点总数; (b) 没有或极少量火点日示例; (c) 少量火点日示例; (d) 大量火点日示例

Fig. 2 Satellite-detected fire locations denoted by dots in May 2017 within the study area: (a) Total fires in this month; (b) example of days with almost no fire ; (c) example of days with small number of fires ; (d) example of days with dense fires

平均浓度高于  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , PM2.5 浓度的这种区域分布形势, 与华北地区地形及气象条件密切相关。图 4 中月平均风场显示: 太行山脉以西、以北的山地地区为偏西气流, 太行山以东、以南的平原地区气流以偏东或东南为主, 这两股气团在山前地区形成

一条明显的辐合带, 影响河南北部、河北东南部、天津以及北京东南部地区。结合卫星监测的火点分布情况分析得出, 这种流场形势十分有利于华北平原、长三角等地的生物质燃烧排放向华北东北部地区输送。

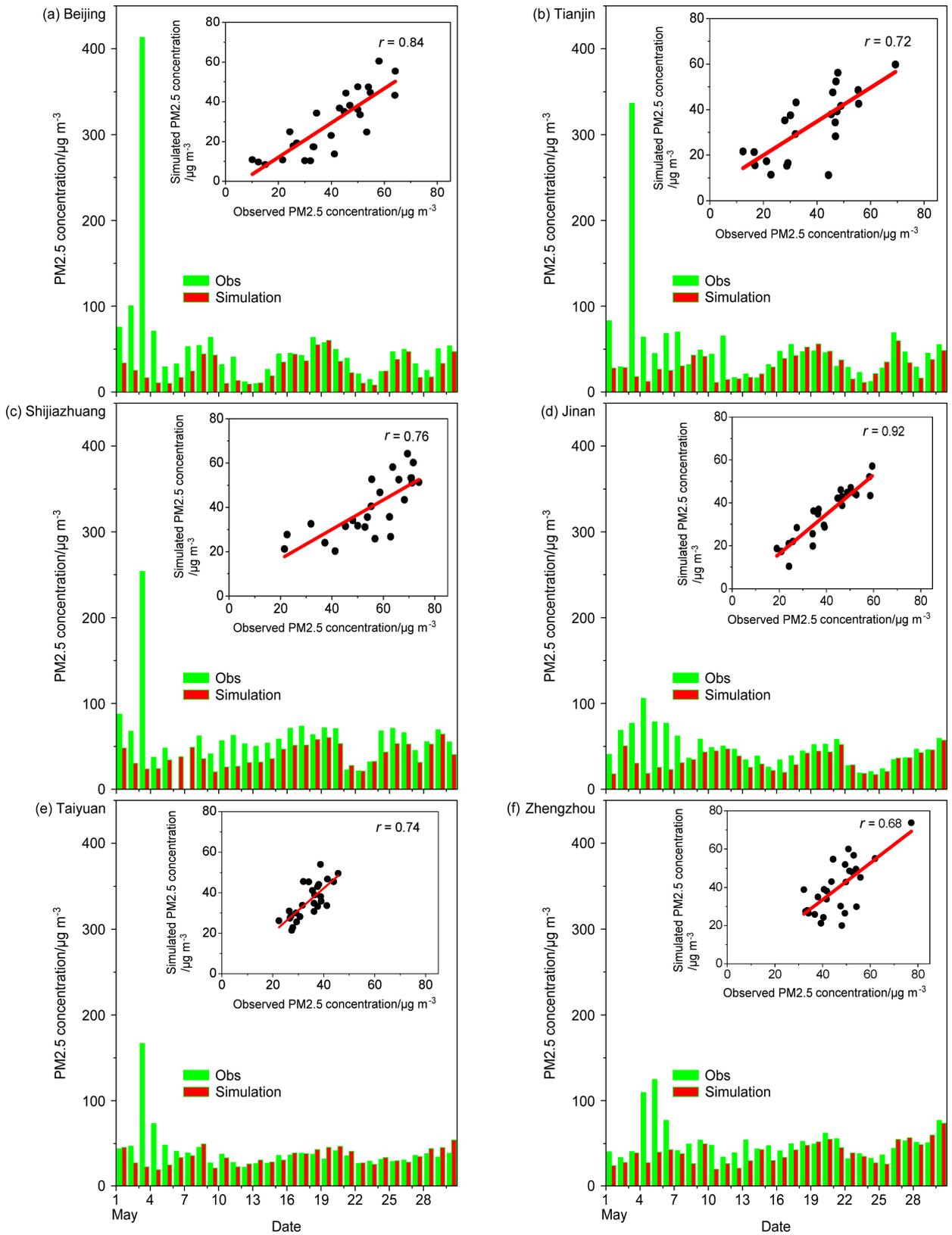


图3 2017年5月主要测点 PM2.5 浓度日均值模拟与观测对比

Fig. 3 Observed and simulated daily mean concentrations of PM2.5 at major sites in May 2017

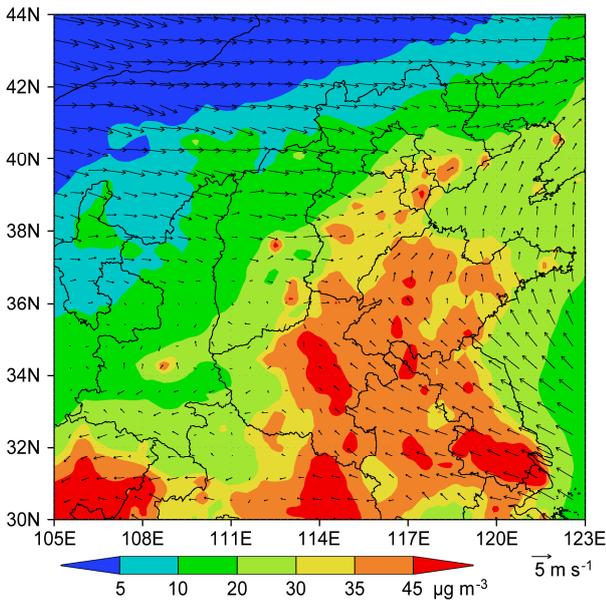


图4 2017年5月PM2.5浓度月平均值及2m高度平均风场水平分布  
Fig. 4 Spatial distributions of averaged concentration of PM2.5 and 2-m height mean wind field in May 2017

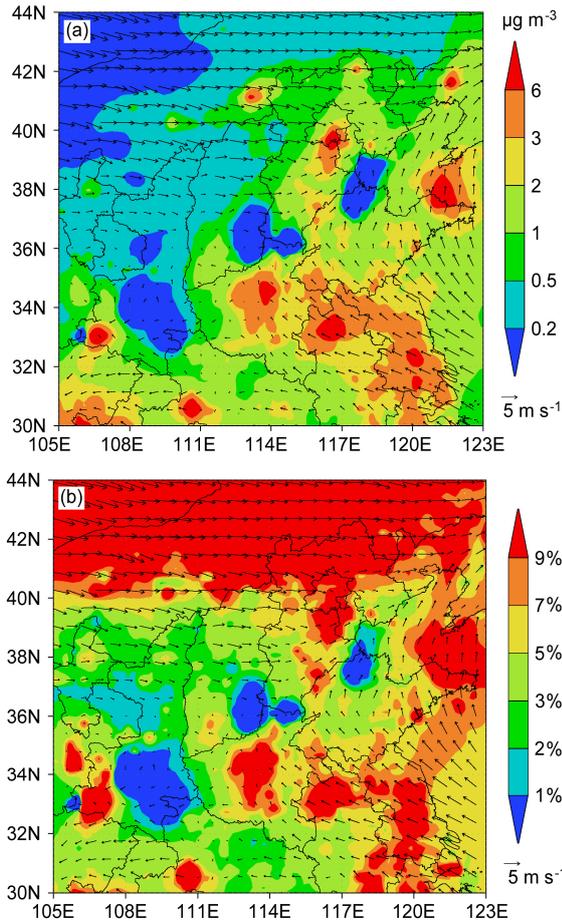


图5 2017年5月生物质燃烧排放导致PM2.5浓度(a)增加量及(b)增加比例月平均值的区域分布  
Fig. 5 Spatial distributions of (a) averaged increment and (b) percentages of increment of PM2.5 concentration due to the biomass burning in May 2017

### 3.3 秸秆燃烧排放对华北地区PM2.5浓度的影响

图5为2017年5月秸秆燃烧排放导致PM2.5浓度增加量及增加比例月平均值的区域分布。其中,浓度增加量为生物质燃烧排放情景减去基础情景的差值,浓度增加比例为该差值所占基础情景浓度值的百分比。图5显示,就浓度差值来看,生物质燃烧排放导致PM2.5浓度升高的区域集中在华北平原及长三角地区,其分布区域与卫星监测的主要火点分布位置吻合,这些地区PM2.5浓度月平均值上升幅度普遍高于 $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,高值区超过了 $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。需要指出的是,尽管卫星监测显示北京本地没有火点燃烧现象,但北京的东南部大兴和通州部分地区PM2.5浓度月平均值明显上升,最高值可达 $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。结合火点分布以及地面风场的分布形势来看,北京东南部地区PM2.5浓度上升主要与河北东南部、山东、河南以及长三角地区秸秆燃烧的输送有关。图5b显示,PM2.5浓度增加比例的分布与浓度增加量的分布形势大体吻合,高值区比例上升可达10%以上。不同之处在于:图5a显示内蒙古东部地区同样出现了比例上升的高值区(高于12%),尽管这些地区生物质燃烧排放导致PM2.5浓度月平均值的变化极小(低于 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ),但从火点分布情况及风场分析得出,这些微小的变化主要源于局地以及偏西风作用下来自蒙古国地区零星火点燃烧排放的传输贡献,由于该地区PM2.5基础浓度偏低,使得这些微小变化占有较高的比例。

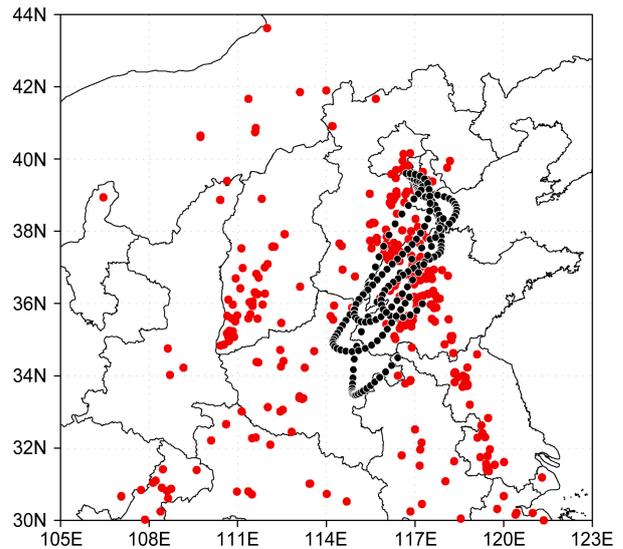


图6 2017年5月27日北京地区100m高度气团后向24h轨迹图(黑点)以及周边卫星监测火点(红点)分布状况  
Fig. 6 (a) HYSPLIT 24-h back-trajectories at 100-m height originating from Beijing (blank dots) and (b) satellite-detected fires (red dots) on 27 May 2017

### 3.4 华北区域秸秆燃烧排放对北京地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度的影响

3.3 节分析显示北京地区受周边地区秸秆燃烧的影响，导致东南部地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度明显升高，为了进一步揭示该影响的演变过程，选择 2017 年 5 月 27 日作为典型案例进行分析。气团后向 24 h 轨

迹（图 6）显示，影响北京东南部地区的气团主要经过河北东南部、山东西北部以及天津等地区，而卫星同时监测到这些地区出现大量的燃烧火点。

5 月 27 日 12:00（协调世界时，下同）至 28 日 00:00 地面 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化的演变趋势（见图 7）显示，27 日 12:00 华北平原 PM<sub>2.5</sub> 浓度上升的地区

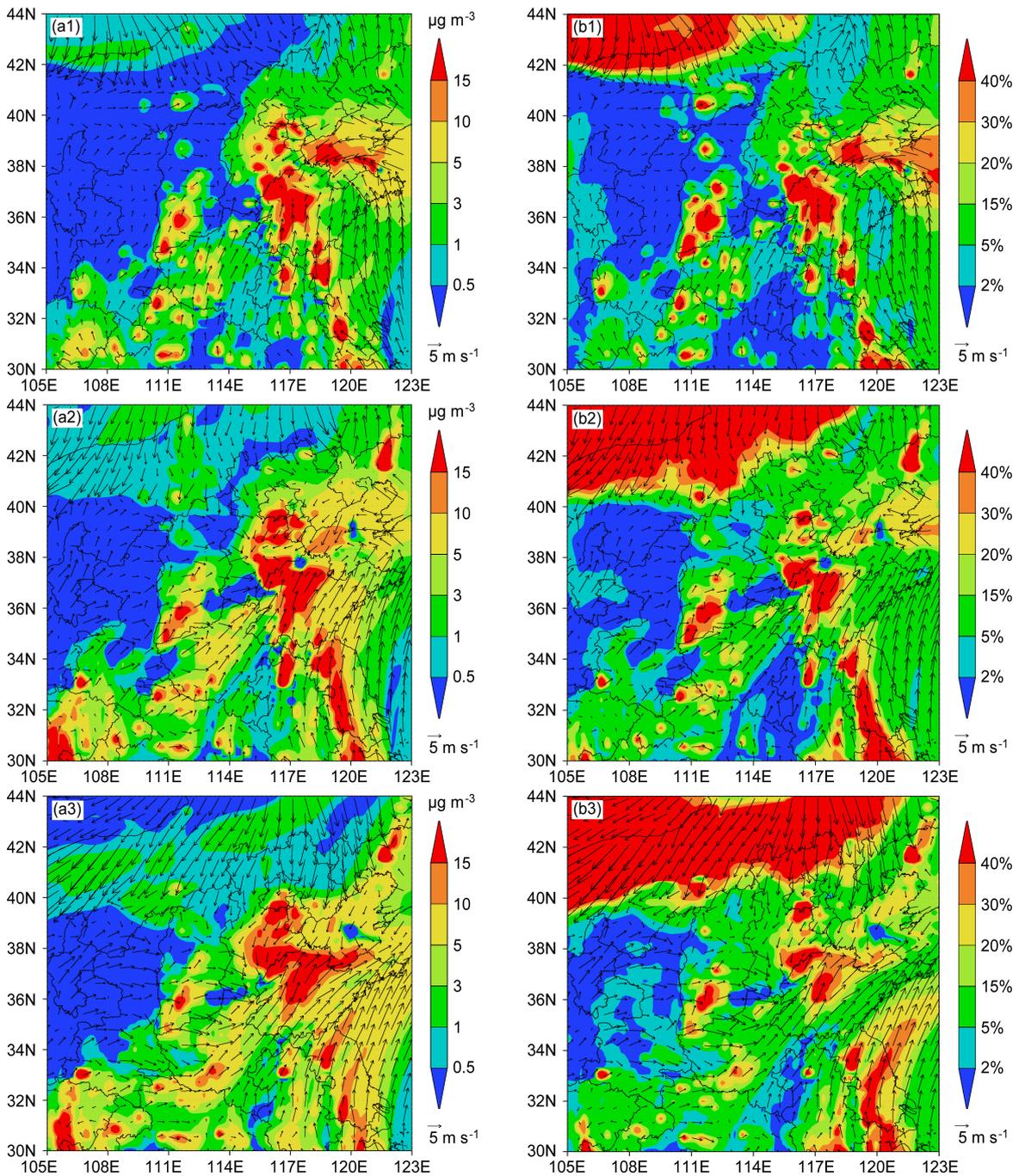


图 7 2017 年 5 月 (a1、b1) 27 日 12:00、(a2、b2) 27 日 18:00、(a3、b3) 28 日 00:00 地面 PM<sub>2.5</sub> 浓度增加量 (左列) 及增加比例 (右列)  
Fig. 7 Regional distribution variations of surface PM<sub>2.5</sub> concentration (left panel) and increasing percentage (right panel) at (a1, b1) 1200 UTC 27 May, (a2, b2) 1800 UTC 27 May, and (a3, b3) 0000 UTC 28 May 2017

呈现斑状分布,此后随着东南风的输送作用,逐渐向东北方向移动、影响到北京的东南部地区;27日18:00北京东南部地区出现了PM<sub>2.5</sub>浓度上升的高值区,小时浓度上升幅度超过了17 μg/m<sup>3</sup>;28日00:00前后,随着偏北风的加强,偏北风与东南风在山东西部形成了一条辐合带,燃烧导致的浓度上升高值区随之向东移动。这段时间内,北京东南部地区PM<sub>2.5</sub>浓度逐小时上升比例均高于10%,个别时段超过了40%。由此可见,尽管北京本地没有秸秆燃烧排放的现象,但来自华北平原地区的秸秆燃烧排放对北京(特别是东南部地区)的影响是不容忽视的;从5月27日的典型个例分析来看,河南、山东、天津等地的秸秆燃烧在合适风场的作用下会严重影响北京地区。

#### 4 结论

(1) 卫星监测资料显示,2017年5月华北地区有大量的秸秆焚烧现象,对该地区空气质量造成一定影响的燃烧天数为20 d,占全月总日数的65%左右。

(2) 区域化学传输模式WRF-Chem模拟结果基本再现了2017年5月华北地区PM<sub>2.5</sub>浓度的时空变化规律,典型测点模拟值与观测值的相关系数均达到0.68以上,且数值差异较小,但模拟结果较观测值存在系统性低估。

(3) 华北地区秸秆燃烧排放导致PM<sub>2.5</sub>浓度升高的区域集中在平原农作物产区,其分布位置与卫星监测的火点分布吻合,这些地区PM<sub>2.5</sub>浓度月平均值上升幅度普遍高于3 μg/m<sup>3</sup>,高值区超过了11 μg/m<sup>3</sup>;PM<sub>2.5</sub>浓度增加比例的分布与浓度增加量的分布形势大体吻合,高值区比例上升可超过10%。

(4) 尽管北京本地没有秸秆燃烧排放的现象,但来自华北平原及长三角地区秸秆燃烧的传输影响是不容忽视的,其中对北京东南部地区造成的影响最大;从典型个例分析来看,河南、山东、天津等地的秸秆燃烧在合适风场的作用下会严重影响北京,严重时段内丰台和通州等地PM<sub>2.5</sub>小时浓度上升幅度超过了17 μg/m<sup>3</sup>,上升幅度超过了40%。

#### 参考文献 (References)

Amnuaylojaroen T, Barth M C, Emmons L K, et al. 2014. Effect of different emission inventories on modeled ozone and carbon monoxide in Southeast Asia [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14 (7): 12983–13012, doi:10.5194/acp-14-12983-2014.

Andreae M O, Jones C D, Cox P M. 2005. Strong present-day aerosol cooling implies a hot future [J]. *Nature*, 435 (7046): 1187–1190, doi:10.1038/nature03671.

Cheng Y, Engling G, He K B, et al. 2013. Biomass burning contribution to Beijing aerosol [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13 (15): 7765–7781, doi:10.5194/acp-13-7765-2013.

方冬青, 魏永杰, 黄伟, 等. 2016. 北京市2014年10月重霾污染特征及有机碳来源解析 [J]. *环境科学研究*, 29 (1): 12–19.

Fang Dongqing, Wei Yongjie, Huang Wei, et al. 2016. Characterization and source apportionment of organic carbon during a heavy haze episode in Beijing in October 2014 [J]. *Research of Environmental Sciences (in Chinese)*, 29 (1): 12–19, doi:10.13198/j.issn.1001-6929.2016.01.02.

傅瑜, 王体健, 黄晓娟, 等. 2015. 南京地区典型霾天气个例特征的分析 [J]. *环境科学学报*, 35 (6): 1620–1628.

Fu Yu, Wang Tijian, Huang Xiaoxian, et al. 2015. Comparative analysis on four typical haze cases in Nanjing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese)*, 35 (6): 1620–1628, doi:10.13671/j.hjkxxb.2015.0006.

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 (7): 291–302, doi:10.1016/j.atmosenv.2012.03.048.

Li M, Zhang Q, Kurokawa J, et al. 2015. MIX: A mosaic Asian anthropogenic emission inventory for the MICS-Asia and the HTAP projects [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(23): 34813–34869, doi:10.5194/acpd-15-34813-2015.

Martin M V, Heald C L, Ford B, et al. 2013. A decadal satellite analysis of the origins and impacts of smoke in Colorado [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(3): 7429–7439, doi:10.5194/acp-13-7429-2013.

Nuryanto D E. 2015. Simulation of forest fires smoke using WRF-Chem model with FINN fire emissions in Sumatera [J]. *Procedia Environmental Science*, 24: 65–69, doi:10.1016/j.proenv.2015.03.010.

宋京京, 吴序鹏, 夏祥鳌. 2016. 华东农田秸秆燃烧对常州大气环境的影响 [J]. *气象与环境科学*, 39 (2): 18–25.

Song Jingjing, Wu Xupeng, Xia Xiang'ao. 2016. Impact of crop residue burning in Eastern China on atmospheric environment of Changzhou [J]. *Meteorological and Environmental Sciences (in Chinese)*, 39 (2): 18–25, doi:10.16765/j.cnki.1673-7148.2016.02.003.

Song Y, Zhang Y H, Xie S D, et al. 2006. Source apportionment of PM<sub>2.5</sub> in Beijing by positive matrix factorization [J]. *Atmos. Environ.*, 40 (8): 1526–1537, doi:10.1016/j.atmosenv.2005.10.039.

Wiedinmyer C, Akagi S K, Yokelson R J, et al. 2011. The fire INventory from NCAR (FINN): A high resolution global model to estimate the emissions from open burning [J]. *Geoscientific Model Development*, 4 (3): 625–641, doi:10.5194/gmd-4-625-2011.

徐敬, 马志强, 赵秀娟, 等. 2015. 边界层方案对华北低层O<sub>3</sub>垂直分布模拟的影响 [J]. *应用气象学报*, 26 (5): 567–577.

Xu Jing, Ma Zhiqiang, Zhao Xiujian, et al. 2015. The effect of different planetary boundary layer schemes on the simulation of near surface O<sub>3</sub> vertical distribution [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 26 (5): 567–577, doi:10.11898/1001-7313.20150506.

Yan X Y, Ohara T, Akimoto H. 2006. Bottom-up estimate of biomass burning in mainland China [J]. *Atmos. Environ.*, 40 (27): 5262–5273, doi:10.1016/j.atmosenv.2006.04.040.

Yu L D, Wang G F, Zhang R J, et al. 2013. Characterization and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> in an urban environment in Beijing [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 13 (2): 574–583, doi:10.4209/aaqr.2012.07.

- 0192.
- Zaveri R A, Peters L L. 1999. A new lumped structure photochemical mechanism for large-scale applications [J]. *J. Geophys. Res.*, 104 (D23): 30387–30415, doi:10.1029/1999JD900876.
- Zaveri R A, Easter R C, Peters L K. 2005. A computationally efficient multicomponent equilibrium solver for aerosols (MESA) [J]. *J. Geophys. Res.*, 110 (D24): D24203, doi: 10.1029/2004JD005618.
- 张玉洽, 杨迎春, 李杰, 等. 2016. 东南亚生物质燃烧对我国春季 PM2.5 质量浓度影响的数值模拟 [J]. *环境科学研究*, 29 (7): 952–962. Zhang Yuqia, Yang Yingchun, Li Jie, et al. 2016. Modeling the impacts of biomass burning in southeast Asia on PM2.5 over China in spring [J]. *Research of Environmental Sciences (in Chinese)*, 29 (7): 952–962, doi:10.13198/j.issn.1001-6929.2016.07.02.
- Zhang Y S, Shao M, Lin Y, et al. 2013. Emission inventory of carbonaceous pollutants from biomass burning in the Pearl River Delta region, China [J]. *Atmos. Environ.*, 76: 189–199, doi:10.1016/j.atmosenv.2012.05.055.
- Zhao P S, Dong F, He D, et al. 2013. Characteristics of concentrations and chemical compositions for PM2.5 in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13 (9): 4631–4644, doi:10.5194/acp-13-4631-2013.