

中山市一次灰霾天气过程污染物来源数值模拟分析

麦健华¹, 邓涛^{2*}, 黄焯琪^{2,3}, 于玲玲⁴, 邓雪娇², 蒋争明⁵ (1.中山市气象局, 广东 中山 528400; 2.中国气象学广州热带海洋气象研究所, 广东省区域数值天气预报重点实验室, 广东 广州 510080; 3.中山大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510275; 4.广东省气象台, 广东 广州 510080; 5.中山市环境监测站, 广东 中山 528400)

摘要: 利用 WRF-CMAQ 模式对中山市 2015 年 2 月一次典型灰霾天气过程进行了数值模拟, 并对 2 月 11~12 日这一主要污染时段本地和外地污染源的贡献进行了分析和减排评估。WRF-CMAQ 模式能很好地模拟出该时段的气象条件、PM_{2.5} 浓度以及能见度的变化过程。这次霾污染主要是受弱冷空气影响引起的, 广州佛山、中山本地以及广东省外排放源对中山 PM_{2.5} 浓度的贡献率分别为 33%、30% 和 27%, 外地源的贡献相当大。中山本地工业源和农业源对中山 PM_{2.5} 的贡献分别为 13% 和 8%, 而广佛排放源中, 工业源和农业源对中山 PM_{2.5} 的贡献率分别为 20% 和 7%。对中山和广佛地区农业源减排 30%、50% 和 70% 后, 中山的 PM_{2.5} 浓度分别下降 6%、10% 和 15%, 而对工业排放实施相同幅度的减排后, PM_{2.5} 浓度分别下降 11%、18% 和 23%。随着减排力度的增加, 减排效率的变化并不明显。减排应在灰霾天气开始加重前实施, 在 PM_{2.5} 浓度达到峰值前后减排的效果最为明显, 而当灰霾天气趋于缓解时减排的效果会迅速下降。

关键词: 霾; 污染物来源; 减排; WRF-CMAQ

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2017)09-3258-10

Source analysis of a haze event in Zhongshan by numerical simulation. MAI Jian-hua¹, DENG Tao^{2*}, HUANG Ye-qi^{2,3}, YU Ling-ling⁴, DENG Xue-jiao², JIANG Zheng-ming⁵ (1.Zhongshan Meteorological Service, Zhongshan 528400, China; 2.Guangdong Provincial Key Laboratory of Regional Numerical Weather Prediction, Institute of Tropical and Marine Meteorology, Guangzhou 510080, China; 3.School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510080, China; 4.Guangdong Meteorological Observatory, Guangzhou 510080, China; 5.Zhongshan Environmental Monitoring Station, Zhongshan 528400, China). *China Environmental Science*, 2017,37(9): 3258~3267

Abstract: A WRF-CMAQ modeling system was used to simulate a haze event in Zhongshan during February 2015. Contributions from regional transport and local emissions to PM_{2.5} concentrations as well as the emission reduction strategies were accessed by the model for a representative air pollution episode (Feb. 11th to 12th, 2015). The simulations show reasonable agreement with the observations. The haze event was mainly affected by the intrusion of a weak cold front. The contribution percentage of emissions from Guangzhou and Foshan (GF), Zhongshan local, and emissions outside Guangdong Province were 33%, 30% and 27%, respectively. The contributions from non-local emissions were important in this haze event. The simulations also showed that local industrial and agricultural emissions contributed 13% and 8% of PM_{2.5} in Zhongshan, while those two emissions in GF contributed 20% and 7%. After 30%, 50% and 70% reduction of agricultural emissions in Zhongshan and GF, PM_{2.5} concentrations in Zhongshan deceased by 6%, 10% and 15%, and by 11%, 18% and 23% after the same reduction of industrial emissions in Zhongshan and GF. The emission reduction benefits showed little change under different strategies of agricultural and industrial reduction. Additionally, the emission reduction actions must be taken before the haze event, and it was most effective during the heavy polluted episode. However, the emission reduction became less effective when the haze event was ending.

Key words: haze; pollution source; emission control; WRF-CMAQ

收稿日期: 2017-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(41475105); 中国气象局气候变化专项(CCSF201531); 广东省科技厅公益研究与能力建设专项资金项目(2015A020215020); 中山市科技计划项目(2015B2349); 广州市科技计划项目(201604020028); 广东省气象局科技创新团队计划项目(201704)

* 责任作者, 副研究员, tdeng@grmc.gov.cn

灰霾是大量细微颗粒物悬浮在空气中引起的大气混浊现象^[1]。随着经济的发展以及城市化规模的扩大,灰霾污染已经成为各大城市群面临的最主要空气污染问题之一^[2]。灰霾现象多出现在秋冬季节,特别是在静稳天气条件下,重污染灰霾现象更是频繁发生^[3-5]。灰霾的成因包括内因和外因两方面。内因是大量污染物排放源排放出一次气溶胶和二次气溶胶的前体物,使空气中大气气溶胶的浓度增大^[6-7];外因是在静稳的气象条件下,不利于污染物的扩散,排入大气中的污染物在长时间内是大致稳定的,但灰霾污染却会因为不同的气象条件而表现出不同的严重程度,这是因为大气污染物的稀释扩散能力随着气象条件的不同而不同^[8]。因此,大量关于灰霾的研究聚焦于灰霾与气象条件的关系^[9-14],这些研究对灰霾污染的预报预警作用重大。

研究表明,某地的灰霾污染除了受当地的污染物排放源影响外,不同地区间的污染物相互输送也对污染物的分布影响很大^[15]。近年来越来越多基于数值模式的研究指出,某地灰霾天气的发生,外地排放源所排放的空气污染物通过大气传输能起到相当可观的作用,且外地源的贡献能随着天气条件的变化而变化^[16-19]。在掌握了污染物主要来源的基础上,一些研究提出了限制污染物浓度的防控对策,并对各地的限排减排措施作了评估^[20-23]。李荔等^[24]通过数值模拟指出在燃料控制、工业限产和区域联防下,南京和江苏省的 $PM_{2.5}$ 月均浓度分别下降了 8%和 4%;李莉等^[25]对能源、工业、交通等领域进行不同力度的减排,均能使长三角地区的空气污染物排放量得到不同程度的下降;翟世贤等^[26]通过在数值模拟中设置不同时刻的减排方案,发现采取应急减排的时间越早,效果越明显。在灰霾污染越来越趋向于区域化、多样化的今天,单个区域或单个行业的重点治理往往收效甚微,唯有靠多部门、多区域联合防御,才能有效遏制灰霾污染。

珠江三角洲(以下简称珠三角)位于广东中南部,其地理位置南面临海,北边环山,有利于污染物的积累,近年来因城市发展引起的灰霾污染频发。本文以珠三角的重点城市中山市为研究对

象,对 2015 年 2 月 11~18 日发生在中山的一次典型灰霾污染天气过程进行分析,并对该次过程的主要污染时段进行了数值模拟,研究该次过程空气污染物的主要来源并进行减排评估,以期为该地区乃至整个珠三角区域的灰霾治理提供参考。

1 研究方法

1.1 数据来源

本文所用的数据包括 Micaps 气象数据、中山气象站的温度、湿度、气压、风力风向、能见度等观测数据,以及由中山市环境监测站提供的逐小时 $PM_{2.5}$ 浓度数据,作为霾污染发生时的天气形势以及数值模拟分析的数据基础。

1.2 数值模式设置

Models-3/CMAQ、WRF-Chem、NAQPMS 等中尺度数值模式近年来被广泛应用到灰霾的分析与预报中^[27-29]。本文采用 WRF-CMAQ 模式对中山市 2015 年 2 月份一次典型灰霾过程进行模拟,分析影响中山市的空气污染物的主要来源,并在此基础上进行减排效果评估。中尺度气象数值模式 WRF(3.3.1 版本)利用 fnl 再分析资料作为初始场,其模拟结果可以为 CMAQ 模式(5.0.2 版本)提供精细化格点气象数据。CMAQ 模式由美国国家环境保护署开发,是一个多尺度的欧拉型空气质量模拟和评估系统,在模拟过程中能将天气系统对污染物的输送、扩散、转化和迁移过程的影响融为一体考虑,同时兼顾了区域与城市尺度之间大气污染物的相互影响以及污染物在大气中的各种化学过程对浓度分布的影响^[30]。排放源也是空气质量模型的重要组成部分,本文使用清华大学研发的 2010 年全国排放源清单 MEIC (Multi-resolution Emission Inventories for China)^[31],其空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,该清单把排放源分为电厂、工业、农业、交通和民用五大类,包括了 SO_2 、 NO_x 、CO、PM 等主要大气污染物。对排放源进行空间插值,并分配不同的时间系数^[32],为 CMAQ 模式提供三维的随时间、空间变化的排放源数据。

数值模拟采用双层嵌套方案,外层区域采用模式默认的边界条件,空间分辨率为 27km,内层

区域采用外层区域模拟结果作为边界条件,分辨率为 9km.模拟范围以及珠三角主要城市位置如图 1 所示(实线为 WRF 模式范围,虚线为 CMAQ 模式范围),CMAQ 模式的外层网格包括了我国大部分地区,内层网格包括了广东省的整个地域范围,是研究的重点区域.模拟过程中所采用的主要参数化方案如表 1 所示.

表 1 数值模拟所采用的参数化方案
Table 1 A summary of configurations used in the WRF-CMAQ simulations

物理和化学过程	参数化方案
云微物理过程	WSM6 方案
边界层过程	YSU 方案
陆面过程	Noah 方案
气相化学过程	CB05 方案
气溶胶过程	AEROS 方案

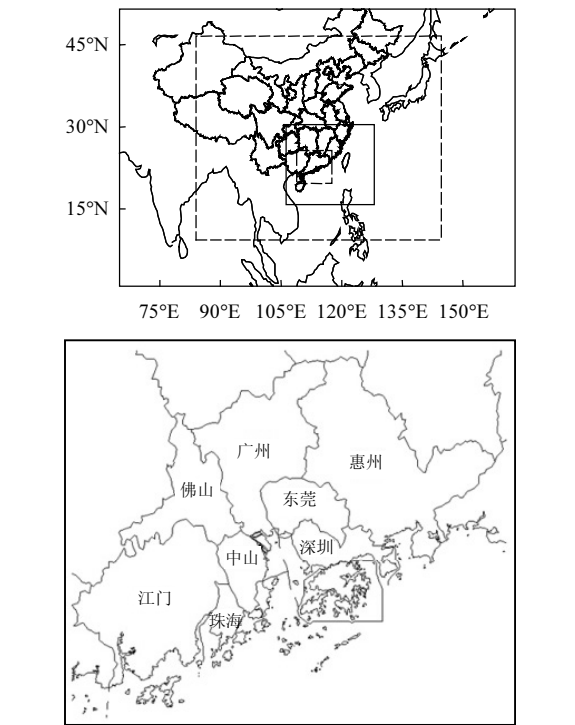


图 1 (a)模式网格范围以及(b)珠江三角洲主要城市位置
Fig.1 (a)Two-nested modeling domains for the models and (b)the major cities in the PRD region

1.3 各地污染源贡献率的计算

为考察中山当地以及外地的排放源在这次

灰霾天气中对中山灰霾污染状况的影响程度,利用 CMAQ 模式开展污染源试验,以研究不同地区对中山 $PM_{2.5}$ 浓度的贡献,试验的主要思路是“归零法”,即把某一地区的全部排放设置为零,把设置前后的模拟结果进行对比,得出该地区排放源对中山当地 $PM_{2.5}$ 浓度的贡献率^[33].但“归零法”易受到二次污染物对源排放非线性化学响应的影 响,难以保证质量守恒,与实际情况会有偏差^[34].各地排放源的贡献率可通过下式计算:

$$C_x=C_{ctr}-C_{x,0}$$
(1)

$$P_x=C_x/C_{ctr}\cdot100\%$$
(2)

式中: C_x 和 P_x 分别为区域 x 中排放源被设置为零后的浓度变化及对中山本地空气污染的贡献率, C_{ctr} 和 $C_{x,0}$ 为基准试验中以及区域 x 中排放量为 0 的情况下中山市 $PM_{2.5}$ 的浓度.

本文的污染物来源试验根据珠三角各主要城市与中山的地理位置关系,共设置了 6 组数值模拟试验,数值模拟设计方案如表 2 所示,试验时间段为 2 月 11 日 08:00 到 2 月 13 日 08:00.

表 2 污染物来源试验设计方案
Table 2 A summary of experiment simulations for source analysis

试验名称	屏蔽排放源
Test_ctr	基准试验,不屏蔽
Test_zs	中山
Test_gf	广州、佛山
Test_zj	珠海、江门
Test_dsh	东莞、深圳、惠州
Test_gd	广东省外

注:试验时间段为2月11日08:00到2月13日08:00.

2 灰霾过程基本情况

灰霾日的定义为排除中雨量级以上降水,日均能见度小于 10km,且日均相对湿度小于或等于 90%^[35].2015 年 2 月 11~18 日,中山市出现了连续的灰霾天气,按照定义,该时段内除了 13、14 日,其余 6 日均属于灰霾日.图 2 为该段时间内中山市能见度与 $PM_{2.5}$ 浓度的时间变化,可以看出气溶胶高污染时段主要集中在 2 月 11~12 日和 2 月 15~16 日.其中 2 月 12 日 $PM_{2.5}$ 日均浓度为

138 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,为中山市 2015 年的最高值;2 月 15 日 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度 113 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,但日均能见度仅有 2.1km,为中山市 2015 年灰霾日中日均能见度的最低值,这是因为当天的日均相对湿度达到 88%,比 2 月 12 日的 65%明显要大,气溶胶吸湿增长,造成的低能见度现象更为严重.2 月 13~14 日, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度维持在较低水平,能见度回升明显,灰霾天气得到缓解.从 2 月 16 日到 18 日, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度逐日下降,能见度逐日上升.虽然 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较低,但由于 16~18 日日均相对湿度均较高(80%以上),日均能见度低于 10km,因此这 3d 仍被划分为灰霾日.

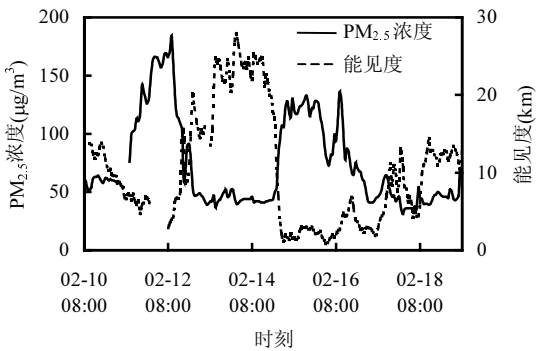


图 2 灰霾过程中山市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与能见度的时间变化
Fig.2 The temporal variations of $\text{PM}_{2.5}$ concentrations and visibility of Zhongshan during the haze event

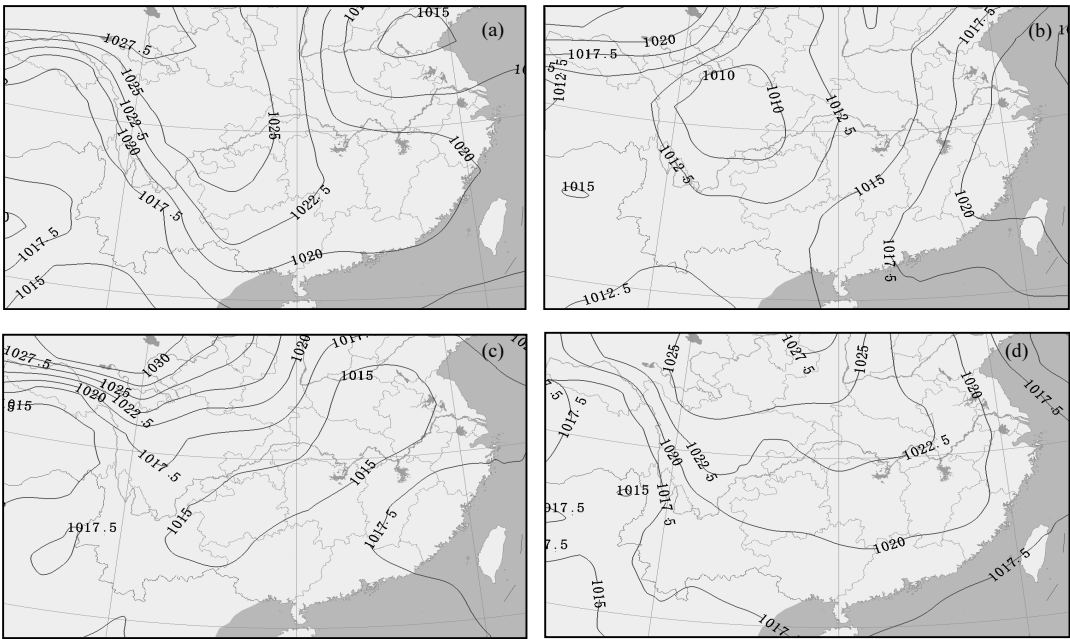


图 3 (a)2 月 11 日 08:00、(b)2 月 14 日 08:00、(c)2 月 15 日 08:00、(d)2 月 16 日 08:00 海平面气压场
Fig.3 The sea level pressure on (a) 08:00 11 Feb., (b) 08:00 14 Feb., (c) 08:00 15 Feb., (d) 08:00 16 Feb

大陆高压型和变性高压脊型是中山最为常见的灰霾天气形势^[36].本次灰霾过程的天气形势以大陆高压型和变性高压脊型为主,且两种天气形势在不断地互相转换,主要表现为冷空气的南下和出海变性.图 3 分别给出了 11 日、14 日、15 日和 16 日 08:00 的海平面气压场,可以看出 11 日和 16 日均有冷空气的南下渗透,而 14 日和 15

日为冷空气减弱出海,广东省受变性高压脊控制.当有冷空气南下渗透时,有利于上游地区的空气污染物向下游输送,所以这时容易导致中山出现灰霾天气.13、14、15 日的天气形势则较为相似,均为变性高压脊型,但 13、14 日并没有出现灰霾现象,而 15 日的灰霾现象非常明显,这可能是由于 12 日的冷空气对空气污染物有一定清除作

用,13、14 日冷高压出海后,到达中山的气流以海上较为清洁的气流为主,陆地上的污染物输送明显减弱,此时灰霾的出现主要以本地污染源排放的污染物所引起,但污染物的累积也需要一段时间,因此 13、14 日灰霾现象出现了短暂的间歇,一直到 15 日污染物进一步积累,而且当地地面平均风速仅有 0.8m/s,非常不利于污染物的扩散,较高的相对湿度也对气溶胶吸湿增长非常有利,因此灰霾现象再次出现,而且能见度非常低.由此可知,即使天气形势较为相似,但是否会引起灰霾现象仍需考虑污染物的输送、累积和具体的气象要素情况.

3 模拟结果分析

3.1 模式模拟结果验证

由于 2 月 12 日的日均 $PM_{2.5}$ 浓度最高,因此选择 2 月 11 日 08:00 到 2 月 13 日 08:00 为数值模拟的主要分析时段.WRF 模拟结果的准确性将直接影响到 CMAQ 的模拟,因此先进行 WRF 模拟结果的验证.图 4 为实况和模拟的 2 月 11 日 20:00 海平面气压场,可见两图的气压分布非常相似,在我国的西部为一明显的高压区,从这一高压区有冷空气渗透南下,1020hPa 等压线南压到广东西北部,而 1017.5hPa 等压线则位于南海北部,可见此时广东正受弱冷空气补充影响.图 5 为中山气象站 2 月 11 日 08:00 到 13 日 08:00 的实况气温、相对湿度、风速和模拟结果的对比,表 3 给出了各模拟量的统计参数,计算方法详见附录.从气温来看,模拟温度比实况温度略偏高,二者的时间分布基本一致,相关系数达到 0.92.对相对湿度的模拟除了个别时次之外,总体上模拟湿度比实况湿度要偏低,其平均偏差为 -12%,但时间变化与实况一致,体现出夜间高日间低的特点,相关系数为 0.75.风速与下垫面的分布状况密切相关,是气象模拟的一大难点.从模拟风速与实况风速的比较来看,模拟风速基本要比实况偏大,其平均偏差和平均误差分别为 0.8m/s 和 1.0m/s,但在变化趋势上,模式成功模拟出了 11 日白天风速增大、11 日夜间风速减小,以及 12 日夜间风速先增大再减小的时间分布,对风速产生明显变化的时

间节点的模拟基本是合理的.从以上分析可知,WRF 模式对气象场的模拟是可信的.

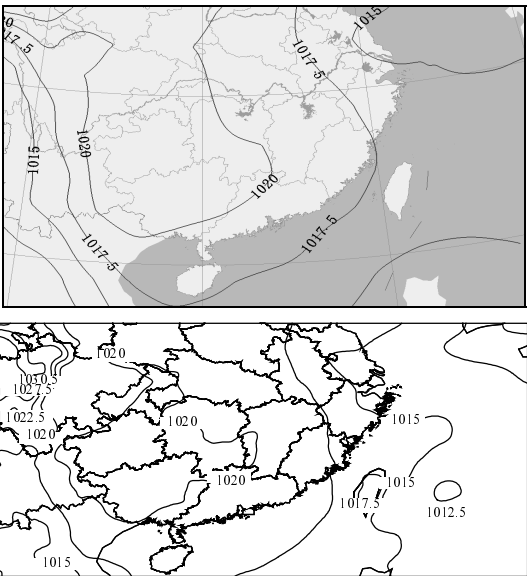
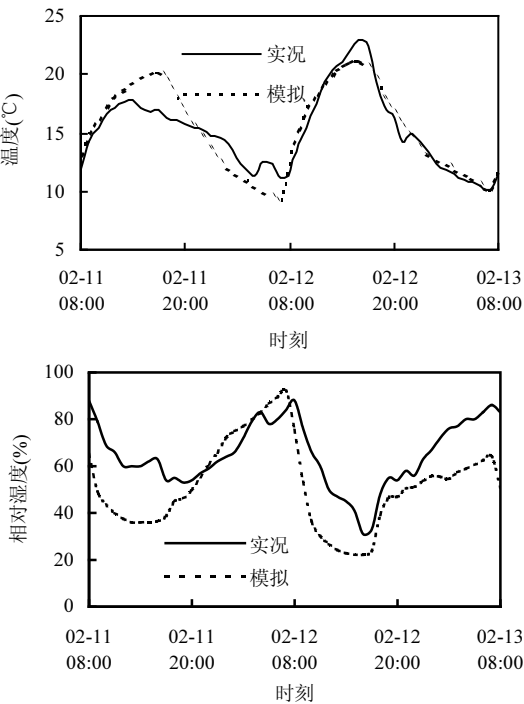


图 4 2 月 11 日 20:00(a)实况海平面气压场与(b)模拟海平面气压场的对比

Fig.4 (a) Observed sea level pressure versus (b) simulated on 20:00 11 Feb.



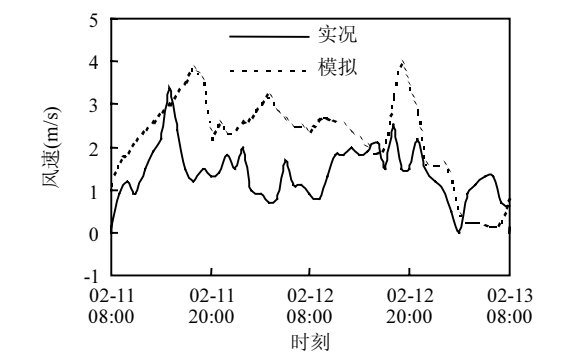


图 5 WRF 模拟的(a)气温、(b)相对湿度、(c)风速与实况的对比

Fig.5 Simulated (a) temperature, (b) relative humidity and (c) wind speed versus observed

图 6 为 CMAQ 模拟的中山气象站 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和能见度与实况的对比,可见 CMAQ 模式能准确模拟出 2 月 11 日到 12 日白天的灰霾污染过程.从 11 日白天开始,中山市的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度明显上升,到 12 日上午达到最高值,之后 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度迅速下降,灰霾天气得到缓解.总体上由于模拟风速比实况风速要大,在一定程度上不利于污染物的积累,因此模拟 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度比实况要偏低,其平均偏差为 $-22\mu\text{g}/\text{m}^3$.模拟 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度达到峰值的时间要比实况提前 3h 左右,这可能是因为气象模式对南岭地形的考虑有所不足,使模拟的冷空气到达珠三角的时间比实况提前,而本次过程中有大部分的污染物是通过冷空气的平流作用到达中山的,因此污染物浓度达到峰值的时间也有所提前.但实况浓度与模拟浓度的相关系数为 0.72,说明 CMAQ 模式仍能准确模拟出气溶胶浓度的变化过程.与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相对应,对能见度的模拟也能反映出中山市 11~12 日出现了明显的灰霾污染.不同的是,从 11 日到 12 日,实况能见度虽然也在下降,但 11 日的能见度也已经处在较低水平,因此下降的幅度不明显;而由于 11 日白天模拟 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度比实况偏低,因此这段时间的模拟能见度比实况偏高.能见度的模拟平均偏差为 1.7km,相关系数 0.58,模拟能见度开始回升的时间也比实况提前约 3h 左右,与 $\text{PM}_{2.5}$ 的变化趋势相一致.由以上分析可知,CMAQ 模式对 11~12 日灰霾污染过程的模拟是准确的.

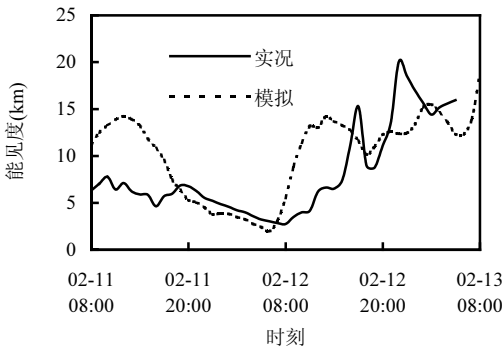
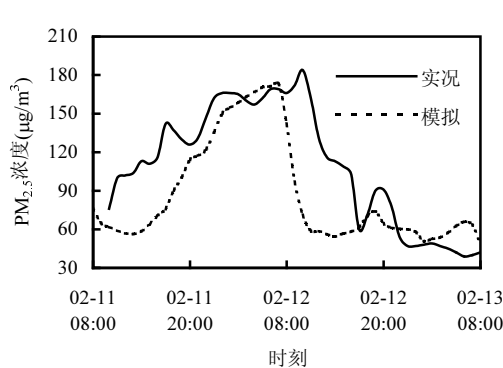


图 6 CMAQ 模拟(a) $\text{PM}_{2.5}$ 浓度、(b)能见度与实况的对比

Fig.6 Simulated (a) $\text{PM}_{2.5}$ concentrations and (b) visibility versus observed

表 3 WRF 和 CMAQ 的模拟效果统计参数
Table 3 Statistical parameters for model performance of WRF and CMAQ

统计量	平均偏差	平均误差	标准差	相关系数
气温($^{\circ}\text{C}$)	0.2	1.1	1.4	0.92
相对湿度(%)	-12	15	17	0.75
风速(m/s)	0.8	1.0	1.2	0.45
$\text{PM}_{2.5}$ 浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	-22	29	39	0.72
能见度(km)	1.7	3.5	4.5	0.58

3.2 气溶胶来源分析

为考察中山本地、外地的排放源在这次灰霾天气中对中山灰霾污染状况的影响程度,利用 CMAQ 模式开展污染来源试验,以研究不同地区对中山 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的贡献.污染来源试验的时间段为 2 月 11 日 08:00 到 2 月 13 日 08:00(本地时间),由于污染过程主要集中在 11 日白天到 12 日白天,因此选取 11 日 12:00~12 日 12:00 作为研究气溶胶来源的主要时段.

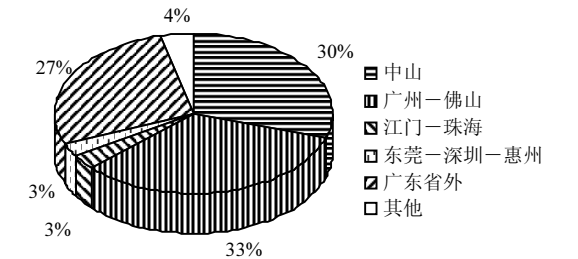


图 7 研究时段内各地排放源对中山 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的贡献

Fig.7 Percentage contributions of the emissions from different regions to the simulated $\text{PM}_{2.5}$ in Zhongshan

按照表 2 的试验内容进行多次模拟试验后,得到在研究时段内各个地区的污染物排放源对中山 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的贡献如图 7 所示.由于 2 月 11~12 日有弱冷空气南下补充影响中山,一定程度上加强了污染物的水平输送,但这种输送以短距离输送为主,因此广州-佛山的排放源在此次过程中贡献最大,为 33%;中山本地排放源的贡献次之,为 30%;弱冷空气的补充在一定程度上也加强了广东省外排放源的污染物传输,因此省外排放源的贡献也达到了 27%;珠三角其余地区中,江门-珠海和东莞-深圳-惠州的贡献率相当,均为 3%,这是因为受弱冷空气影响,以偏北风为主,因此位于中山西、南、东面的排放源贡献相对较小;

整个珠三角排放源对中山的贡献共为 69%,而广东其他地区排放源的贡献率仅为 4%.由此可见,当有冷空气影响而出现灰霾天气时,外地排放源对中山的影响相当大,广佛、中山本地以及广东省外排放源的贡献率最大.另外,由于气象模式模拟的风速一般会偏大,在一定程度上加强了污染物的跨地区输送,且弱化了静小风条件下所产生的污染,所以模式的结果可能会高估了外地排放源的贡献,而低估了中山本地排放源的贡献.

图 8 分别为中山、广佛以及广东省外排放源对珠三角地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度贡献率的空间分布.从图可见,中山的排放源主要影响本地的气溶胶分布,对周边城市基本上没有影响;其贡献率在中心城区最大,达 30%以上,从市中心到周边镇区,贡献率逐渐减小.广佛排放源影响最明显的地区位于佛山的东部以及广州的南部,其中对佛山东南部地区的贡献率达 60%以上,其对中山北部 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献率可达 50%以上,但在南部则减小到 30%以下.广东省外的排放源对珠三角的影响非常大,其对广州和佛山的北部、东莞和深圳的东部贡献率可达 50%以上,而对中山的贡献率在 25%到 30%之间,说明由于冷空气的影响,污染物存在着明显的跨地区输送.

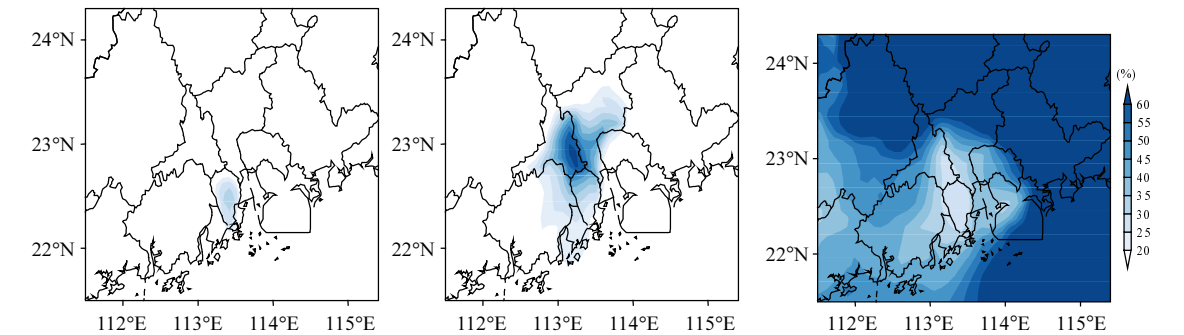


图 8 研究时段内(a)中山、(b)广佛以及(c)广东省外排放源对珠三角地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的贡献率分布

Fig.8 Spatial distribution of percentage contributions of (a) local emissions in Zhongshan, (b) emissions from Guangzhou and Foshan, and (c) emissions from outside of Guangdong Province to the simulated $\text{PM}_{2.5}$ in Zhongshan

模拟试验使用的清华 MEIC 排放清单把排放源分为电厂、工业、农业、交通和民用五大类,由上文分析可知,在本次过程中广佛和中山本地排放源的贡献最大,因此进一步讨论在这次灰霾天气中这两个区域各类排放源对中山 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度

的贡献率.如图 9 所示,在中山本地排放源中,工业源所占的贡献最大,为 13%,其次为农业源的为 8%,民用源和交通源的贡献率相当,分别为 5%和 4%,电厂源贡献率最低,接近 0%.而在广佛排放源中,工业源的贡献达到了 20%,其次为农业源的

7%,交通、民用、电厂源的贡献率分别为 3%、2%和 1%。由此可见,在本次灰霾天气中工业源的贡献比重远大于其他行业,其中广佛地区的工业源贡献最大.农业源的贡献率也相当可观,这是因为 NH₃ 主要由这部分的排放源排出,据有关研究,在珠三角地区农业源占人为 NH₃ 排放的贡献在 80%以上^[37],而 NH₃ 与硫酸和硝酸结合成盐,形成硫酸铵和硝酸铵气溶胶,在 PM_{2.5} 中所占的比重较大,因此这部分排放源的贡献率不容忽视.目前关于这部分排放源的不确定性较大,贡献量在学术上仍有争议^[38-39].其余种类排放源的贡献率均明显低于工业贡献及农业贡献.

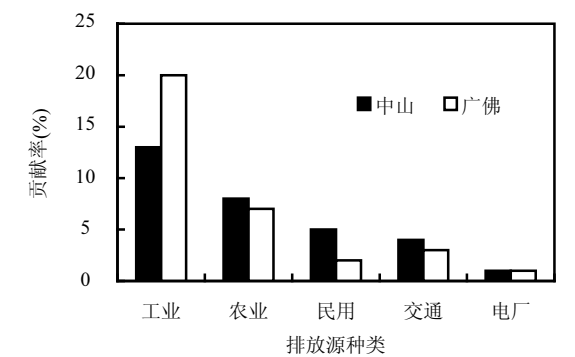


图9 中山和广佛各类排放源对中山 PM_{2.5} 的贡献率
Fig.9 Percentage contributions of different emissions from Zhongshan and GF to the simulated PM_{2.5} in Zhongshan

3.3 减排试验分析

由上文分析可知,广佛和中山的工业源和农业源对中山本次灰霾过程贡献最大,因此对中山和广佛的工业排放及农业排放分别实施减排,减排幅度设置为 30%、50%和 70%,并观察减排实施后 PM_{2.5} 浓度下降的幅度、能见度上升的幅度以及减排效率,其中减排效率定义如下:

减排效率=(PM_{2.5} 减少比例/减排百分比)×100%
(3)

减排效率可衡量减排措施的投入与实际取得效果的经济效益,是一个评价减排措施是否高效的指标.减排从 11 日 12:00 灰霾天气开始出现前开始,到 12 日 12:00 灰霾天气缓解后结束.中山和广佛地区的工业源和农业源排放中,对 PM_{2.5} 的形成影响较大的物种年排放总量如表 4 所示.

其中,SO₂、PM_{2.5}、NO_x 和 VOC 全部由工业源排出,而 NH₃ 的排放中,农业源的比例占 99%以上.除了 NH₃ 的排放以佛山最多以外,其余污染物的排放广州均居于首位,而中山的污染物排放量明显比广州和佛山要低.

表 4 广州、佛山和中山工业源和农业源主要污染物年排放总量

Table 4 Major air pollutants from industrial and agricultural emissions of Guangzhou, Foshan and Zhongshan					
物种	SO ₂	PM _{2.5}	NO _x	VOC	NH ₃
广州	147640	43347	96917	223510	8246
佛山	113791	33914	74823	171742	14897
中山	29267	8695	19237	44476	4741
总和	290698	85956	190977	439728	27884

注:表中各物种排放量单位为:t/a.

表 5 不同减排力度下 PM_{2.5}、能见度的变化幅度以及减排效率

Table 5 Percentage changes of simulated PM _{2.5} concentrations and visibility, and the emission control efficiency under different strategies						
项目	农业减排 30%	农业减排 50%	农业减排 70%	工业减排 30%	工业减排 50%	工业减排 70%
PM _{2.5} 浓度下降(%)	6	10	15	11	18	23
能见度上升(%)	4	8	12	5	9	14
减排效率(%)	20	20	22	36	36	33

减排效果以及减排效率如表 5 所示.随着减排力度的增加,减排效果趋于明显,对于农业减排和工业减排,减排力度从 30%增加到 50%再到 70%,PM_{2.5} 浓度下降幅度的变化以及能见度上升幅度的变化基本相同,说明随着减排力度的加大,PM_{2.5} 浓度的下降以及能见度的上升基本呈准线性变化.而由于工业源的贡献比农业的贡献要大,因此在减排幅度相同的前提下,工业减排的影响明显比农业要大.减排效率主要跟 PM_{2.5} 下降的幅度以及减排力度有关,从表 5 可见,随着减排力度的增加,减排效率的变化并不明显,说明了减排力度的增大并不能使效率明显提高,但也不会使

效率明显降低从而造成过度浪费,由于不同减排力度下减排效率变化并不明显,因此想要达到一定的减排目标,仍然需要对减排力度进行加大.

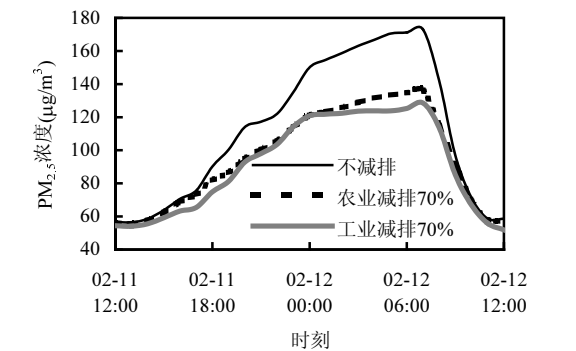


图 10 农业、工业减排 70%前后 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度时间变化对比
Fig.10 Temporal variations of $\text{PM}_{2.5}$ concentrations when agricultural and industrial emissions were reduced by 70%

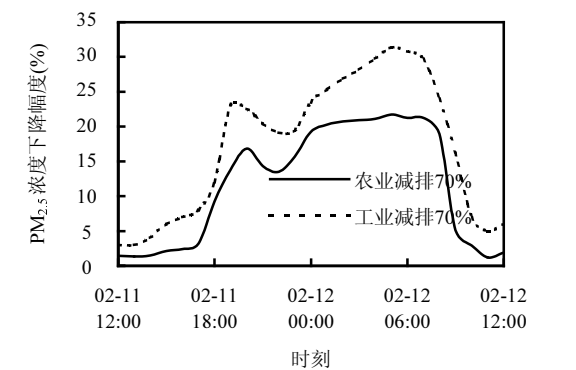


图 11 农业、工业减排 70%后 $\text{PM}_{2.5}$ 下降幅度时间变化
Fig.11 Temporal variations of percentage changes of $\text{PM}_{2.5}$ concentrations when agricultural and industrial emissions were reduced by 70%

图 10、图 11 为中山和广佛地区农业和工业分别减排 70%后 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度以及其下降幅度的时间变化.可以看出,虽然减排力度不随时间变化,但减排后 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的变化幅度却有着明显的差异,当 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较低时,减排前后变化幅度很小,随着 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度增大,减排后 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降的幅度迅速上升,当 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度达到峰值前后,减排效果最为明显,此时农业减排下 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降的幅度在 20% 以上,工业减排下 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降幅度更可达到 30% 以上.之后随着 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度从峰值下降,减排的效果迅速减小.从以上分析可知,开始减排和结束

减排的时机把握非常重要,在灰霾天气开始加重前实施减排,在 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度达到峰值前后减排的效果最为明显;当灰霾天气趋于缓解时减排的效果会迅速下降,此时即可停止减排,以免造成不必要的浪费.这是因为大多数灰霾污染过程结束都是因为冷空气南下,相对于灰霾的积累,属于快速变化的过程,即使不减排污染物浓度也会迅速下降.

4 结论

4.1 2015 年 2 月 11~18 日中山市的灰霾过程的天气形势以大陆高压型和变性高压脊型为主,当有冷空气南下时,会使污染物的跨地区输送增强,导致中山出现灰霾天气;当冷空气减弱出海时,霾污染主要来自静小风条件下本地污染源所排放污染物的累积.

4.2 WRF-CMAQ 模式能很好地模拟出 2 月 11~12 日的气象条件、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度以及能见度的变化过程.该次污染过程是由弱冷空气影响引起的,广州佛山、中山本地以及广东省外排放源对中山 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的贡献率分别为 33%、30%和 27%,外地排放源的贡献相当明显.而在各行业的排放源对中山 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献中,工业源和农业源的贡献率最大,中山的工业源和农业源贡献率分别为 13%和 8%,广佛地区工业排放和农业排放的贡献率分别为 20%和 7%.

4.3 针对地区和行业开展减排评估,分别对中山、广佛地区的工业排放和农业排放实施减排.农业减排 30%、50%和 70%后,中山 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分别下降 6%、10%和 15%,而对工业排放实施相同幅度的减排后, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分别下降 11%、18%和 23%.随着减排力度的增加,减排效率的变化并不明显.减排的时机把握相当重要,在灰霾天气开始加重前实施减排,在 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度达到峰值前后减排的效果最为明显,而当灰霾天气趋于缓解时减排的效果会迅速下降.

附录:表 3 模式模拟效果统计参数定义:

$$\text{平均偏差 MB} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{Sim}(i) - \text{Obs}(i))$$
$$\text{平均误差 ME} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\text{Sim}(i) - \text{Obs}(i)|$$

$$\text{标准差 RMSE} = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{Sim}(i) - \text{Obs}(i))^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

相关系数

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n [(\text{Sim}(i) - \overline{\text{Sim}})(\text{Obs}(i) - \overline{\text{Obs}})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\text{Sim}(i) - \overline{\text{Sim}})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (\text{Obs}(i) - \overline{\text{Obs}})^2}}$$

参考文献:

- [1] 林良勋. 广东省天气预报技术手册 [M]. 北京: 气象出版社, 2006: 253-257.
- [2] Li Y C, Yu J Z, Ho S, et al. Chemical characteristics of PM_{2.5} and organic aerosol source analysis during cold front episodes in Hong Kong, China [J]. Atmospheric Research, 2012, 118: 41-51.
- [3] 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾—霾成因及其治理的思考 [J]. 科学通报, 2013, 13: 1178-1187.
- [4] 陈欢欢, 吴 兑, 谭浩波, 等. 珠江三角洲 2001~2008 年灰霾天气过程特征分析 [J]. 热带气象学报, 2010, 26(2): 147-155.
- [5] 高 怡, 张美根. 2013 年 1 月华北地区重雾霾过程及其成因的模拟分析 [J]. 气候与环境研究, 2014, 19(2): 140-152.
- [6] Chan C. Air pollution in mega cities in China [J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(1): 1-42.
- [7] 吴剑斌, 王 茜, 王自发. 上海市夏季颗粒物污染过程数值模拟研究 [J]. 环境科学学报, 2015, 35(7): 1982-1992.
- [8] 吴 兑. 近十年中国灰霾天气研究综述 [J]. 环境科学学报, 2012, 32(2): 257-269.
- [9] 吴 兑, 吴 晟, 李海燕, 等. 穗港晴沙两重天—2010 年 3 月 17-23 日珠三角典型灰霾过程分析 [J]. 环境科学学报, 2011, 31(4): 695-703.
- [10] 高 岑, 王体健, 吴建军, 等. 2009 年秋季南京地区一次持续性灰霾天气过程研究 [J]. 气象科学, 2012, 32(3): 246-252.
- [11] 俞建蔚, 孙 燕, 张 备, 等. 江苏沿江一次重霾天气成因分析 [J]. 气象科学, 2009, 29(5): 665-669.
- [12] Wu D, Tie X X, Li C, et al. An extremely low visibility event over the Guangzhou region: A case study [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(35): 6568-6577.
- [13] Ji D S, Wang Y S, Wang L L, et al. Analysis of heavy pollution episodes in selected cities of northern China [J]. Atmospheric Environment, 2012, 50: 338-348.
- [14] 麦健华, 邓 涛, 于玲玲, 等. 中山市旱季霾特征及数值模拟分析 [J]. 环境科学学报, 2016, 36(6): 2170-2179.
- [15] 王自发, 李 杰, 王 哲, 等. 2013 年 1 月我国中东部强霾污染的数值模拟和防控对策 [J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 1: 3-14.
- [16] 李 锋, 朱 彬, 安俊岭, 等. 2013 年 12 月初长江三角洲及周边地区重霾污染的数值模拟研究 [J]. 中国环境科学, 2015, 35(7): 1965-1974.
- [17] 周 阳, 陈 璐, 孟丽江, 等. 天津市区县间大气污染相互传输贡献研究 [J]. 环境科学与技术, 2015, 4: 112-115.
- [18] 张 艳, 余 琦, 伏晴艳, 等. 长江三角洲区域输送对上海市空气质量影响的特征分析 [J]. 中国环境科学, 2010, 30(7): 914-923.
- [19] 陈焕盛, 王自发, 吴其重, 等. 亚运时段广州大气污染物来源数值模拟研究 [J]. 环境科学学报, 2010, 30(11): 2145-2153.
- [20] Mai J H, Deng T, Yu L L, et al. A modeling study of impact of emission control strategies on PM_{2.5} reductions in Zhongshan, China, using WRF-CMAQ [J]. Advances in Meteorology, 2016, Article ID 5836070, 11 pages.
- [21] Xing J, Zhang Y, Wang S X, et al. Modeling study on the air quality impacts from emission reductions and atypical meteorological conditions during the 2008 Beijing Olympics [J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(10): 1786-1798.
- [22] 陈 璐, 周 阳, 王 伟, 等. 天津市 PM_{2.5} 排放源构成分析及防治措施评估 [J]. 城市环境与城市生态, 2014, 27(3): 26-30.
- [23] 刘 俊, 安兴琴, 朱 彤, 等. 京津冀及周边减排对北京市 PM_{2.5} 浓度下降评估研究 [J]. 中国环境科学, 2014, 34(11): 2726-2733.
- [24] 李 荔, 刘 倩, 李 冰, 等. 南京青奥会期间管控措施空气质量改善效果评估 [J]. 环境科学研究, 2016, 29(2): 175-182.
- [25] 李 莉, 安静宇, 卢 清, 等. 清洁空气行动计划实施对长三角地区 PM_{2.5} 污染改善效果模拟评估 [J]. 环境科学研究, 2015, 28(11): 1653-1661.
- [26] 翟世贤, 安兴琴, 刘 俊, 等. 不同时刻污染减排对北京市 PM_{2.5} 浓度的影响 [J]. 中国环境科学, 2014, 34(6): 1369-1379.
- [27] 邓 涛, 吴 兑, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲一次典型复合型污染过程的模拟研究 [J]. 中国环境科学, 2012, 32(2): 193-199.
- [28] 王 哲, 王自发, 李 杰, 等. 气象—化学双向耦合模式(WRF-NAQPMS)研制及其在京津冀秋季重霾模拟中的应用 [J]. 气候与环境研究, 2014, 19(2): 153-163.
- [29] 周广强, 谢 英, 吴剑斌, 等. 基于 WRF-Chem 模式的华东区域 PM_{2.5} 预报及偏差原因 [J]. 中国环境科学, 2016, 36(8): 2251-2259.
- [30] 王占山, 李晓倩, 王宗爽, 等. 空气质量模型 CMAQ 的国内外研究现状 [J]. 环境科学与技术, 2013, 36(S1): 386-391.
- [31] He K B. Multi-resolution emission inventory for China (MEIC): model framework and 1990-2010 anthropogenic emission [R]. International Global Atmospheric Chemistry Conference, 2012.
- [32] 郑君瑜, 张礼俊, 钟流举, 等. 珠江三角洲大气面源排放清单及空间分布特征 [J]. 中国环境科学, 2009, 29(5): 455-460.
- [33] Streets D G, Fu J S, Jang C J, et al. Air quality during the 2008 Beijing Olympic Games [J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(3): 480-492.
- [34] Gao J, Zhu B, Xiao H, et al. Diurnal variations and source apportionment of ozone at the summit of Mount Huang, a rural site in Eastern China [J]. Environmental Pollution, 2017, 222: 513-522.
- [35] 吴 兑, 陈慧忠, 吴 蒙, 等. 三种霾日统计方法的比较分析—以环首都圈京津冀晋为例 [J]. 中国环境科学, 2014, 34(3): 545-554.
- [36] 李颖敏, 邓雪娇, 邓 涛, 等. 中山市 2000~2014 年霾天气特征及气象影响因子 [J]. 中国环境科学, 2016, 36(6): 1638-1644.
- [37] 尹沙沙. 珠江三角洲人为源氨排放清单及其对颗粒物形成贡献的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [38] 钱晓雍, 郭小品, 林 立, 等. 国内外农业源 NH₃ 排放影响 PM_{2.5} 形成的研究方法探讨 [J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(10): 1908-1914.
- [39] 赵天良, 柳 笛, 李 恬, 等. 农业活动大气污染物排放及其大气环境效应研究进展 [J]. 科学技术与工程, 2016, 16(28): 144-152.

作者简介: 麦健华(1985-), 男, 广东中山人, 工程师, 硕士, 主要从事中短期天气预报以及环境气象研究工作. 发表论文 5 篇.