侯梦玲, 王宏, 赵天良, 等. 2017. 京津冀一次重度雾霾天气能见度及边界层关键气象要素的模拟研究 [J]. 大气科学, 41 (6): 1177–1190. Hou Mengling, Wang Hong, Zhao Tianliang, et al. 2017. A modeling study of the visibility and PBL key meteorological elements during a heavy fog-haze episode in Beijing–Tianjin–Hebei of China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (6): 1177–1190, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1703.16211.

京津冀一次重度雾霾天气能见度及边界层关键气象要素的模拟研究

侯梦玲[1] 王宏[2] 赵天良[1] 车慧正[2]

1 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

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室/中国气象局大气化学重点开放实验室，北京 100081

摘 要 本文利用 GRAPES_CUACE 大气化学模式对京津冀地区 2015 年 12 月重度雾霾过程进行了模拟和评估。京津冀地区能见度和 $PM_{2.5}$ 模拟值与观测值的对比表明：该模式能较好地模拟京津冀地区能见度和 $PM_{2.5}$ 的逐日变化情况，但模式存在对伴随着重污染发生的低能见度模拟偏高的问题。以 12 月 5～10 日的重度雾霾过程为重点，针对地面风速、边界层高度、相对湿度、$PM_{2.5}$ 及其对能见度的影响进行了详细分析，研究结果表明：污染过程中大部分地区过程平均风速低于 2 m s^{-1}，边界层平均高度低于 600 m，相对湿度较高。模式低能见度模拟偏高可能因为：（1）模式模拟重雾霾时段的 $PM_{2.5}$ 极大值浓度偏低。（2）模拟相对湿度存在系统性偏低的误差，这一误差对能见度的影响表现为两方面，一是相对湿度会通过影响可溶性气溶胶的吸湿增长过程影响气溶胶质量浓度，导致气溶胶消光系数的计算偏低；二是目前模式中采用的能见度的参数化公式考虑了相对湿度对气溶胶吸湿增长的影响，没有考虑雾滴的直接消光作用。

关键词 雾霾 $PM_{2.5}$ 能见度 相对湿度 GRAPES_CUACE 模式

文章编号 1006-9895(2017)06-1177-14 **中图分类号** P401 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1703.16211

A Modeling Study of the Visibility and PBL Key Meteorological Elements during a Heavy Fog-Haze Episode in Beijing−Tianjin−Hebei of China

HOU Mengling[1], WANG Hong[2], ZHAO Tianliang[1], and CHE Huizheng[2]

1 *Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education /Joint International Research Laboratory of 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 & Technology, Nanjing* 210044

2 *State Key Laboratory of Severe Weather & Key Laboratory of Atmospheric Chemistry of China Meteorological Administration, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing* 100081

Abstract The heavy fog-haze episode occurred in Beijing–Tianjin–Hebei region during December 5–10, 2015 was simulated using GRAPES_CUACE (Global/Regional Assimilation and PrEdiction System coupled with the China Meteorological Administration Unified Atmospheric Chemistry Environment). Characteristics of wind speeds at the

收稿日期 2016-08-05；**网络预出版日期** 2017-04-13

作者简介 侯梦玲，女，1992 年出生，硕士研究生，主要从事大气物理与大气环境方面的研究。E-mail: houmengling@126.com

通讯作者 王宏，E-mail: wangh@cam.gov.cn；赵天良，E-mail: tlzhao@nuist.edu.cn

资助项目 科技部大气污染专项项目 2016YFC0203306，国家重点基础研究发展计划（973 计划）项目 2014CB441201，国家自然科学基金项目 41590874

Funded by National Key Foundation Study Developing Programs (Grant 2016YFC0203306), National Basic Research Program of China (973 Program) (Grant 2014CB441201), National Natural Science Foundation of China (Grant 41590874)

surface, PBLH (Planetary boundary layer height), relative humidity and $PM_{2.5}$ concentration as well as their impacts on visibility were analyzed in detail. The results show that the diurnal variation of visibility and $PM_{2.5}$ mass concentration in Beijing−Tianjin−Hebei region could be well simulated while the low visibility during the heavy fog-haze pollution was over estimated. The average wind speed was lower than 2 m s^{-1} and the average PBLH was lower than 600 m in most areas during the fog-haze episode. The overestimation of the low visibility by the model are due to the following reasons according to the simulation analysis. First, the maximum concentration of $PM_{2.5}$ during the heavy fog haze episode was underestimated; second, the simulated relative humidity was lower than observations, which affected the hygroscopic growth process of soluble aerosols and the concentration of aerosols, leading to changes in aerosol extinction; and the current parametric formula doesn't take into consideration the direct extinction of fog-drops. These results indicate that the simulation and prediction of surface relative humidity have important impacts on accurate simulation of low visibility during heavy fog-haze episodes.

Keywords Fog-haze, $PM_{2.5}$, Visibility, Relative humidity, GRAPES_CUACE model

1 引言

大气能见度是表征大气透明度的一个重要指标。能见度的高低与人们的生活息息相关，低能见度会缩短人们的视程，影响海陆空交通运输；低能见度条件下，极易发生交通事故，对人们的生命财产造成损失。近年来，重度雾霾事件频发（吴兑，2011；Tao et al., 2012；邓涛等，2013；孙彧等，2013；张小玲等，2014），与颗粒物污染紧密相关的低能见度也成为衡量雾霾污染程度最重要的指标之一（王京丽和刘旭林，2006； Zhang et al.，2010），因此大气能见度的相关研究受到大气、环境领域乃至社会的广泛关注。

大气能见度在中国地区气象台站使用广泛，长期、系统性的台站观测网数据成为分析重度雾霾污染的有力工具。影响大气能见度的关键因素是大气颗粒物（特别是细粒子）（Sisler and Malm, 1994；宋宇等，2003）和水汽（杨军等，1999；曹伟华等，2013；高怡和张美根，2014)。大气中的颗粒物对光线有散射和吸收作用，大气中的颗粒物浓度增加，光的传播减弱，能见度降低（周淑贞和张超，1985；章澄昌和周文贤，1995；Baik et al., 1996；于凤莲等，2002）；水汽对能见度的影响体现在两个方面：一是当空气湿度未饱和时，水汽会影响水溶性气溶胶的吸湿增长，通过影响颗粒物的浓度从而影响颗粒物的消光（杨军等，1999）；二是当空气处于过饱和状态时，雾滴的直接消光严重，能显著降低能见度（马志强等，2012）。

目前利用模式模拟是研究和预测雾霾的有力手段之一。对中国东部的雾霾模拟已有较丰富的研究结果。韩素芹等（2008）利用 WRF-chem 模式研究了天津环境特征污染物日变化规律，发现 NO_x 和 $PM_{2.5}$ 的浓度高值出现在清晨和晚上，午后至傍晚浓度较低。高怡和张美根（2014）利用 WRF-chem 模拟了华北地区 2013 年 1 月的雾霾过程，发现污染期间华北地区相对湿度较高，风速较历史平均值明显偏小。适宜的风向将水汽输送到华北地区，有利于气溶胶的吸湿增长和气溶胶浓度的升高。张小玲等（2014）利用 WRF-Chem 模拟了 2013 年 1 月 27～31 日华北平原的雾霾过程，认为高湿条件使 $PM_{2.5}$ 浓度在短时间内迅速升高，高浓度的 $PM_{2.5}$ 以及高湿的条件使能见度降低，雾霾的维持与 $PM_{2.5}$ 和高湿条件密切相关。费建芳等（2009）利用 MODELS-3/CMAQ 模式对 2002 年 12 月 1～3 日北京一次大雾天气进行模拟也得出了类似的结论。Han et al.（2013）利用 RAMS-CMAQ 模式模拟了 2010 年 12 月华北地区的雾霾过程，发现硫酸盐和硝酸盐是影响消光的两种主要无机气溶胶成分，对消光的贡献可达 40%～50%。蓝静等（2013）利用 MM5/CMAQ（Models-3 NCAR/Penn State Mesoscale Model Version 5）模式模拟了香港机场一次空气污染事件，此次过程 $PM_{2.5}$、NO_2 的污染严重。但在所有的研究当中，对能见度的研究较少，能见度既涉及水汽，又涉及 $PM_{2.5}$，有一定复杂性，因此本文将选取京津冀地区发生的一次重污染过程，对能见度及其相关影响因子进行研究。

2015 年 12 月，京津冀地区经历了多次重雾霾污染过程。12 月 5～10 日为该月第一次持续重雾霾天气过程，使用环保部大气环境监测总站全国观测站网京津冀地区（北京、天津、承德、秦皇岛、唐山、张家口、保定、沧州、衡水、石家庄、邢台和邯郸）69 个观测站监测数据计算得出，12 月 5 日 00 时（协调世界时，下同）至 12 月 10 日 23 时京津冀过程 $PM_{2.5}$ 平均浓度为 173 μg m^{-3}，污染期间

北京 $PM_{2.5}$ 小时峰值浓度达到 282 μg m^{-3}，最低能见度小于 300 m。本文选取该次污染过程，利用 GRAPES-CUACE 模式进行了模拟，针对重雾霾过程中能见度及影响能见度的关键因素进行了详细分析。

2 模式介绍

2.1 GRAPEA_CUACE 模式

GRAPES-CUACE 模式由两部分组成，分别为中国气象局研发的新一代全球/区域同化、预报系统（Global/Regional Assimilation and PrEdiction System，简称 GRAPES）的中尺度预报模式（GRAPES-Meso）（庄世宇等，2005；陈德辉和沈学顺, 2006；Zhang et al.，2008；Yang et al., 2007, 2008；陈德辉等，2008；徐国强等，2008；薛纪善等，2008；朱国富等，2008）和中国气象科学研究院研发的大气化学模块（Chinese Unified Atmospheric Chemistry Environment，简称 CUACE）（Gong and Zhang, 2008; Zhou et al., 2008; 王宏等，2009）。该系统已广泛应用于沙尘、雾霾等方面的研究（赵建华等，2012；Wang et al., 2013；Jiang et al.，2015；Wang et al., 2015a, 2015b）。

GRAPES 模式采用全可压非静力平衡动力框架，半隐式半拉格朗日时间差分方案（陈德辉等，2003；Yang et al.，2007, 2008），资料变分同化方案（庄世宇等，2005；朱国富等，2008），可选的、优化的物理过程参数化方案（徐国强等，2008），垂直坐标采用高度地形追随坐标，模式预报跳层采用 Charney-Philips 跳层，使用经纬度坐标，Arakawa-C 格点水平分布设置（陈德辉等，2008）。GRAPES-meso 为中尺度预报模式、气体和气溶胶的大规模水平、垂直输送和扩散过程在该部分进行计算（Wang et al., 2015a）。

CUACE 模块用于处理气溶胶、气相化学方面的问题。模式中的气溶胶模块包括黑炭（BC）、有机碳（OC）、道路扬尘（SD）、海盐（SS）、硫酸盐（SF）、硝酸盐（NI）、铵盐（AM）等 6 类 7 种。除铵盐外，其余气溶胶粒子被分为 12 档（0.005～0.01 μm、0.01～0.02 μm、0.02～0.04 μm、0.04～0.08 μm、0.08～0.16 μm、0.16～0.32 μm、0.32～0.64 μm、0.64～1.28 μm、1.28～2.56 μm、2.56～5.12 μm、5.12～10.24 μm 和 10.24～20.48 μm），该模块包含了气溶胶在大气中的主要过程。$PM_{2.5}$ 的质量浓度为全部铵盐的质量浓度与其他 6 种气溶胶前 9 档质量浓度之和。模式中的气体模块包含 66 种气体、21 个光化学反应和 121 个气体化学反应（Wang et al., 2015a）。CUACE 的气态化学和气溶胶模块为在线耦合形式。

本文研究工作采用的物理过程参数化方案选择如下：选用 WSW6 类（水汽、雨、雪、云水、云冰、霰）微物理方案，RRTM（Rapid Radiative Transfer Model）长波辐射方案，Dudhia 简单短波方案, Monin-Obukhov 近地面方案，Noah 陆面过程方案，MRF（Medium Range Forecast Model）边界层方案，Betts-Miller-Janjic 对流参数化方案。

2.2 排放源

模式对污染物的模拟准确性与排放源密切相关。本文使用 2010 年中国地区月排放源清单（Li et al., 2015）。该排放源数据包括工业源、交通源、农业源、电力源、生活源 5 个部门的排放。为了改善模式对污染物日内变化的模拟，将月数据按照一定的系数变化，处理为每小时一次的排放源资料（王亚强等，2014）。该排放源数据包括一氧化碳（CO）、氮氧化物（NO_x）、二氧化硫（SO_2）、氨气（NH_3）、挥发性有机物（VOCs）等 27 种气体和硫酸盐、硝酸盐、黑炭（BC）、有机碳（OC）和道路扬尘 5 种气溶胶共 32 个类型的排放数据（An et al., 2013; Wang et al., 2015a）。

2.3 能见度

模式中使用基于 Koschmieder 定律的经验公式（Koschmieder, 1924; Stoelinga and Warner, 1999）计算能见度，公式为

$$\mathrm{VIS}=\frac{3.912}{b_{\mathrm{ext}}}, \tag{1}$$

其中，VIS 为能见度，单位为 km；b_{ext} 为气溶胶消光系数，单位为 km^{-1}，计算公式（Malm, 2000；U.S. Environmental Protection Agency, 2003; Boylan and Russell, 2006）如下：

$$\begin{aligned} b_{\mathrm{ext}} &= 0.03\times f(\mathrm{RH})\times[Sulfate]+0.003\times f(\mathrm{RH}) \\ &[Nitrate]+0.004\times[Organic\ Carbon]+0.01\times \\ &[Elemental\ Carbon]+0.001\times[Soils]+0.0006\times \\ &[Coarse\ Mass]+0.04 \end{aligned}, \tag{2}$$

其中，$f(\mathrm{RH})$ 为与吸湿性颗粒物种类有关的散射吸湿增长因子，该因子为根据美国 IMPROVE 计划近 10 年（1988～1997 年）每小时相对湿度数据得出。

该因子随湿度的增加而增长，当相对湿度大于 80% 时，f(RH) 随 RH 快速增长，当相对湿度大于 90% 时，增长尤为明显。[*Sulfate*] 是将硫酸盐按 $(NH_4)_2SO_4$ 计算的质量浓度，[*Nitrate*] 是将硝酸盐按 NH_4NO_3 计算的质量浓度，[*Organic Carbon*] 为有机碳的浓度，[*Elemental Carbon*] 为元素碳的浓度，[*Soils*] 为道路扬尘的浓度。[*Coarse Mass*] 为粒径介于 2.5～10 μm 的粗粒子的质量浓度。气体散射产生的消光取 0.04 km^{-1}。[*Sulfate*]、[*Nitrate*]、[*Organic Carbon*]、[*Elemental Carbon*]、[*Soils*] 是 $PM_{2.5}$ 的重要组成成分。由此可以看出能见度与相对湿度和 $PM_{2.5}$ 密切相关。

2.4 研究区域

京津冀地区位于中国东部，为中国雾霾污染最严重的地区之一。针对该地区重雾霾天气情况下能见度的模拟研究较少，特别是对低能见度的模拟研究。本文选取了包括整个中国东部地区在内的模拟区域（见图 1）以进一步探究该地区边界层关键气象要素对能见度的影响。模拟区域原点为（20°N，100°E），网格数为 300（东西）×200（南北），水平分辨率为 0.15°×0.15°，垂直方向有 31 层，最高层高度为 35 km。模式起报时间为 2015 年 11 月 27 日。

2.5 所用数据

本文所用数据共包括 3 类，分别是模式初始场和侧边界场、排放源数据（2.2 节已介绍）和地面台站观测数据。

使用美国国家环境预报中心（National Centers for Environmental Prediction）的 FNL 资料作为模式气象初始场和侧边界，时间间隔为 6 小时，分辨率为 1°×1°。模式首次启动时大气化学初始场采用气候均值，模式滚动模拟，以前一天 24 小时预报值作为当天的化学初始场，实际使用时将舍去前三天的模拟结果以减少大气化学初始场的影响。

$PM_{2.5}$ 浓度资料来源于环保部大气环境监测总站全国观测站网，数据间隔为 1 小时。本文使用了京津冀地区 69 个观测站的资料，观测站分布在城市的不同代表区域，用以代表城市不同区域的 $PM_{2.5}$ 分布特征，每个城市观测站点数量根据不同城市有所变化，计算时取每个城市所有观测站的平均值代表该城市 $PM_{2.5}$ 浓度的平均状况。

地面能见度、露点温度、温度、风速等气象资料来源于中国气象局 MICAPS 地面台站观测资料，该资料用于模式结果的评估和对比分析。数据间隔为 3 小时。因为 MICAPS 资料中未直接给出相对湿度值，为了与模式的相对湿度资料作对比，使用露点温度和温度资料计算出相对湿度。方法如下：

$$\mathrm{RH}=\frac{e_{\mathrm{std}}}{e_{\mathrm{st}}}, \tag{3}$$

其中，RH 为相对湿度，e_{std} 为实际水汽压，由露点温度计算得出。e_{st} 为饱和水汽压，由温度计算得出。当温度大于 0°C 时，采用 Tetents 经验公式计算水面饱和水汽压（盛裴轩等，2013）：

$$e_{\mathrm{st}}=6.107\exp\left[\frac{17.2693882(T-273.16)}{T-35.86}\right], \tag{4}$$

T 为热力学温度（单位：K），转换为以 10 为底的指数形式，为

$$e_{\mathrm{st}}=e_{\mathrm{s0}}10^{\frac{at}{b+t}}, \tag{5}$$

其中，e_{s0} 为 0°C 时的饱和水汽压，t 为摄氏温度，a 和 b 是常数，对水面：a=7.5，b=237.3。当温度低于 0°C 时，采用下式计算饱和冰面的饱和水汽压：

$$e_{\mathrm{st}}=6.112\exp\left[\frac{17.67t}{t+243.5}\right], \tag{6}$$

t 为摄氏温度。计算 e_{std} 时，将露点温度带入公式(5)、(6) 即可。

3 结果与讨论

2015 年 12 月 5～10 日，京津冀地区经历了一次雾霾污染过程，首要污染物为 $PM_{2.5}$，北京 $PM_{2.5}$ 的峰值浓度达到 282 μg m^{-3}，最低能见度低于 300 m，河北部分地区 $PM_{2.5}$ 浓度超过 500 μg m^{-3}。本文对 2015 年 12 月一个月的能见度和 $PM_{2.5}$ 进行了模拟和评估，选取此次污染过程，进行了详细分析。

3.1 模式验证

为了验证模式的模拟效果，本文选取了京津冀地区的 12 个代表性城市 [北京（BJ）、天津（TJ）、承德（CD）、秦皇岛（QHD）、唐山（TS）、张家口（ZJK）、保定（BD）、沧州（CZ）、衡水（HS）、石家庄（SJZ）、邢台（XT）和邯郸（HD）] 进行验证，这 12 城市均匀分布在整个京津冀地区，包括污染严重的河北中南部和污染相对较轻的河北北部地区，具体位置见图 1。

图 2 为 2015 年 12 月京津冀地区 12 个城市能见度观测资料与模拟结果的逐日变化。从图中可以看出，模式能够较准确地模拟京津冀地区能见度的逐日变化趋势，并且对低能见度事件发生和消散的

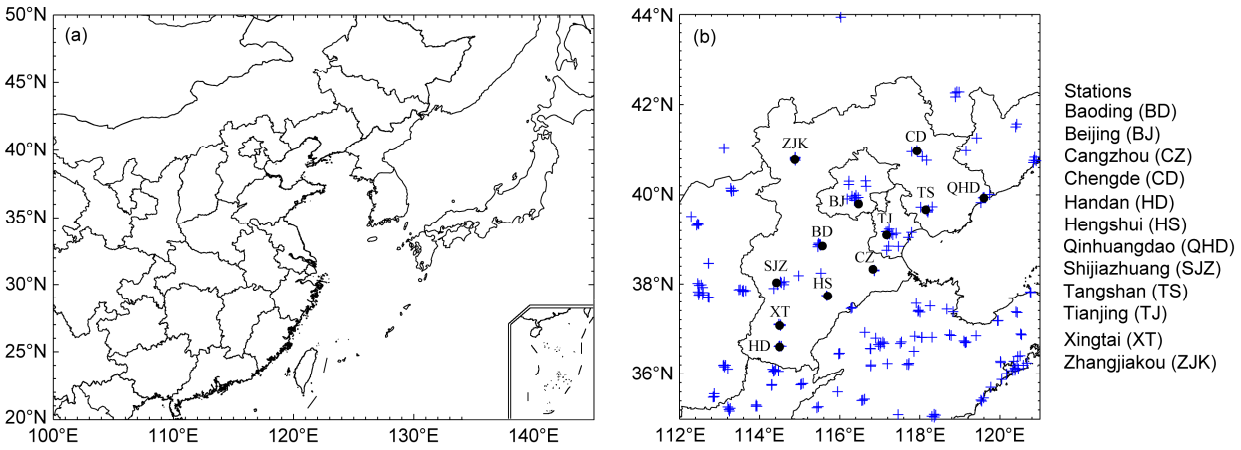

图 1　（a）GRAPES-CUACE 模拟区域（水平分辨率 15 km）及（b）京津冀地区主要城市气象观测站及环保监测站的位置分布

Fig. 1　(a) GRAPES-CUACE model domain at a horizontal resolution of 15 km over East China and (b) locations of the meteorological observation stations and environmental protection monitoring stations in major cities in Beijing–Tianjin–Hebei

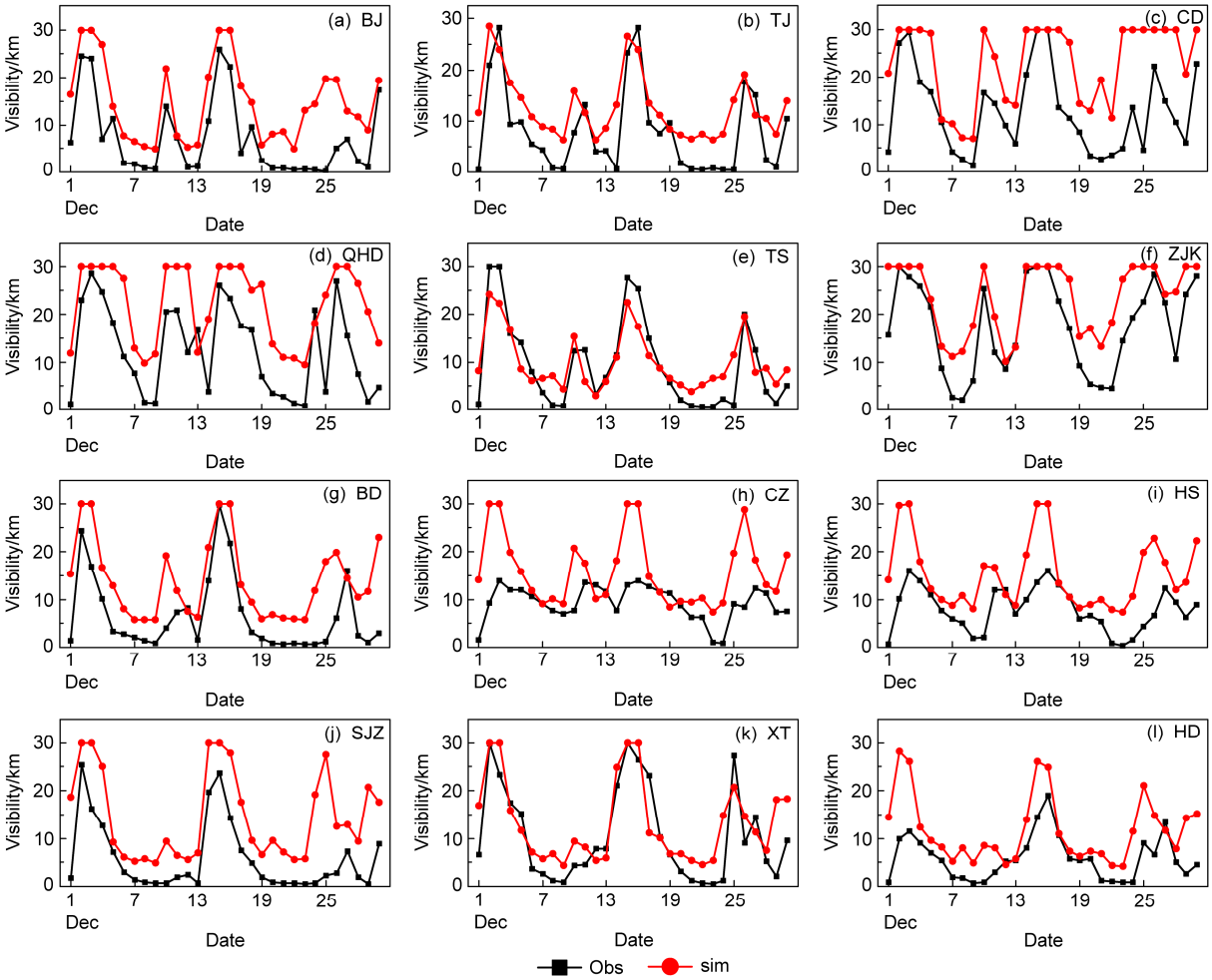

图 2　2015 年 12 月能见度（单位：km）观测资料（黑线）与模拟结果（红线）的逐日变化

Fig. 2　Observed (Obs, black lines) and simulated (sim, red lines) daily average visibility (units: km) during December 2015

时间模拟较好。其中，唐山和邢台模拟效果最佳，但模式对包括唐山和邢台在内的 12 个城市的低能见度模式存在高估。

图 3 为 2015 年 12 月京津冀地区 12 个城市 $PM_{2.5}$ 观测资料与模拟结果的逐日变化。模式对北京、天津、承德、沧州的 $PM_{2.5}$ 模拟较好，对唐山的 $PM_{2.5}$ 存在明显高估。部分城市出现了对 $PM_{2.5}$ 浓度极大值模拟偏低的情况，比如北京 12 月 24～26 日 $PM_{2.5}$ 突然升高，12 月 25 日达到该时段的极大值，为 476.9 μg m^{-3}，而对应的模拟值明显偏低，仅 93.76 μg m^{-3}。但从总体上看，该模式能较准确地模拟京津冀地区 $PM_{2.5}$ 的变化趋势和范围。

承德为 $PM_{2.5}$ 模拟效果较好的城市之一，但对比图 2 中对该城市的能见度模拟可以发现，模式对其能见度存在明显高估。北京、秦皇岛、石家庄、邯郸也出现类似的情况。唐山和邢台为能见度模拟值与观测值较为一致的城市，但在图 3 中可以发现模式对唐山的 $PM_{2.5}$ 存在明显高估，对邢台的 $PM_{2.5}$ 极大值存在明显低估。由模式中能见度的参数化方案可知，能见度模拟的准确性受到 $PM_{2.5}$ 和相对湿度的影响，是一个较为复杂的过程。因此在 3.4 节将对此问题做进一步讨论。

3.2 $PM_{2.5}$ 质量浓度逐日平均区域分布

图 4 为京津冀地区 12 月第一次重污染过程 $PM_{2.5}$ 区域分布的模拟情况。12 月 5 日，污染主要集中在山东、河南与河北交界处，河北省西南部，河北省东部。其中山东省西部，河北省东部和西南部，北京中部细颗粒物浓度超过 250 μg m^{-3}。12 月 6 日污染范围扩大，$PM_{2.5}$ 浓度升高，京津冀地区沿邯郸、邢台、石家庄、保定、北京、唐山形成一条明显的带状重度污染区域，细颗粒物浓度高于 150 μg m^{-3}。12 月 7 日重度污染带状区域面积增大，石家庄、保定、北京、唐山 $PM_{2.5}$ 质量浓度超过 250 μg m^{-3}。12 月 9 日 $PM_{2.5}$ 浓度在 150～250 μg m^{-3} 的

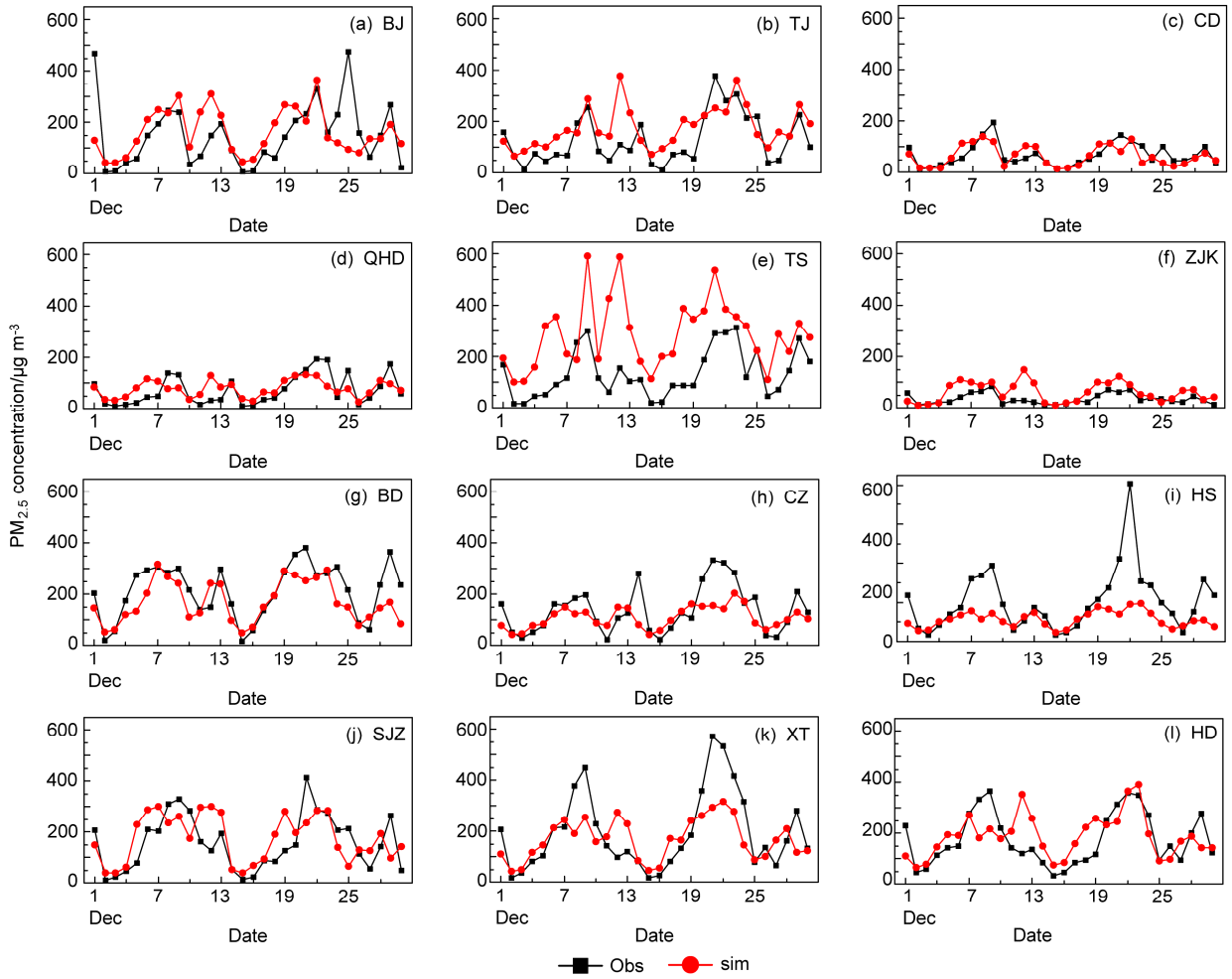

图 3 2015 年 12 月 $PM_{2.5}$ 质量浓度（单位：μg m^{-3}）观测资料（黑线）与模拟结果（红线）的逐日变化

Fig. 3 Observed (Obs, black lines) and simulated (sim, red lines) daily average mass concentrations (units: μg m^{-3}) of $PM_{2.5}$ during December 2015

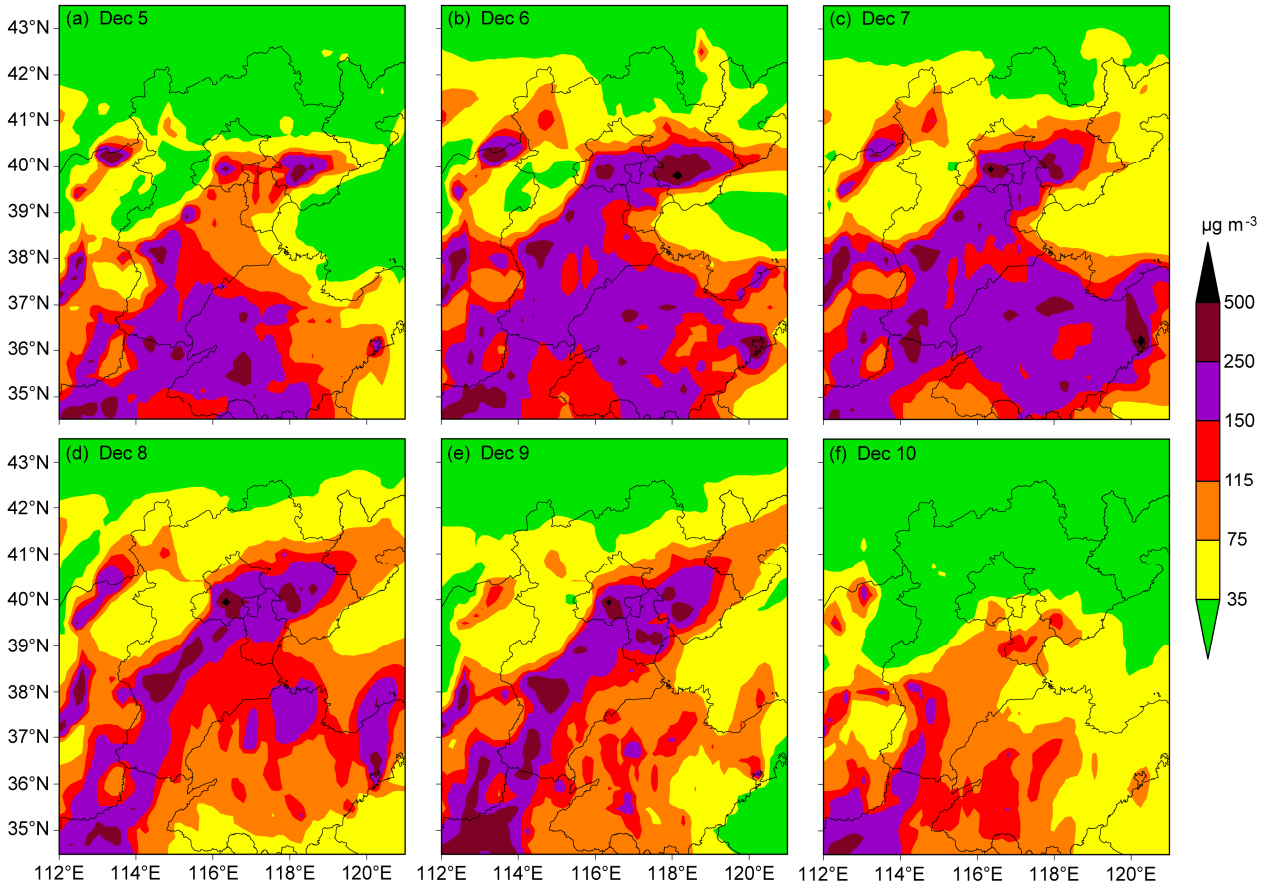

图 4　（a–f）2015 年 12 月 5～10 日京津冀地区模式模拟 $PM_{2.5}$（单位：μg m^{-3}）质量浓度的日平均区域分布

Fig. 4　Horizontal distributions of daily average mass concentration of $PM_{2.5}$ (simulation result, units: μg m^{-3}) in Beijing-Tianjin-Hebei during (a–f) December 5–10, 2015

范围扩大，邯郸、邢台、石家庄、北京、天津和唐山 $PM_{2.5}$ 浓度超过 250 μg m^{-3}，山东污染减弱，大部分地区 $PM_{2.5}$ 质量浓度低于 115 μg m^{-3}。12 月 10 日，污染物浓度明显下降，污染区域南退，河北北部、北京大部分地区 $PM_{2.5}$ 浓度小于 35 μg m^{-3}。

图 5 给出了各城市的边界层高度情况。12 月 5～10 日，12 个城市的边界层高度均低于 1000 m。表 1 统计了边界层高度的过程平均，北京、承德、张家口和石家庄边界层高度较低，过程平均边界层高度在 270～382 m 之间。在此次过程中北京地区边界层平均高度为 364 m, 最高 495 m，最低 277 m，较低的边界层高度，不利于污染物的扩散。该过程中张家口的平均边界层高度为 271 m，低于北京的平均边界层高度，但是与北京不同的是张家口的 $PM_{2.5}$ 基本在 100 μg m^{-3} 以下，这可能与张家口本地及附近污染源较少有关。

3.3　能见度逐日平均区域分布

图 6 给出了 2015 年 12 月 5～10 日京津冀地区能见度区域分布。12 月 5 日河北南部和东部、北京中部能见度较低，部分地区能见度低于 10 km。12 月 6 日，低能见度范围扩大，河北省南部及东部大部分区域，以及北京绝大部分地区能见度低于 10 km。能见度最低值出现在石家庄、北京和唐山，能见度在 5～10 km 范围低能见度区域形成明显的带状区域，与图 4 中 $PM_{2.5}$ 的带状污染区域一致。12 月 7 日，低能见度范围扩大，邯郸和保定的能见度低于 5 km。12 月 8 日北京部分地区能见度低于 3 km，河北南部能见度略有好转。12 月 9 日河南北部低能见度范围减小，南部地区能见度转差，12 月 10 日低能见度区域南撤，大部分地区能见度良好。

图 7 给出了 2015 年 12 月 5～10 日京津冀地区相对湿度及风场的区域分布情况。12 月 5 日相对湿度较低。6 日来自渤海的东南风给京津冀东北部带来了较多的水汽，河北东北部地区相对湿度增加到 60%～70%，丰富的水汽有利于颗粒物的吸湿增长，消光系数增加，该地区污染加重，能见度下降。

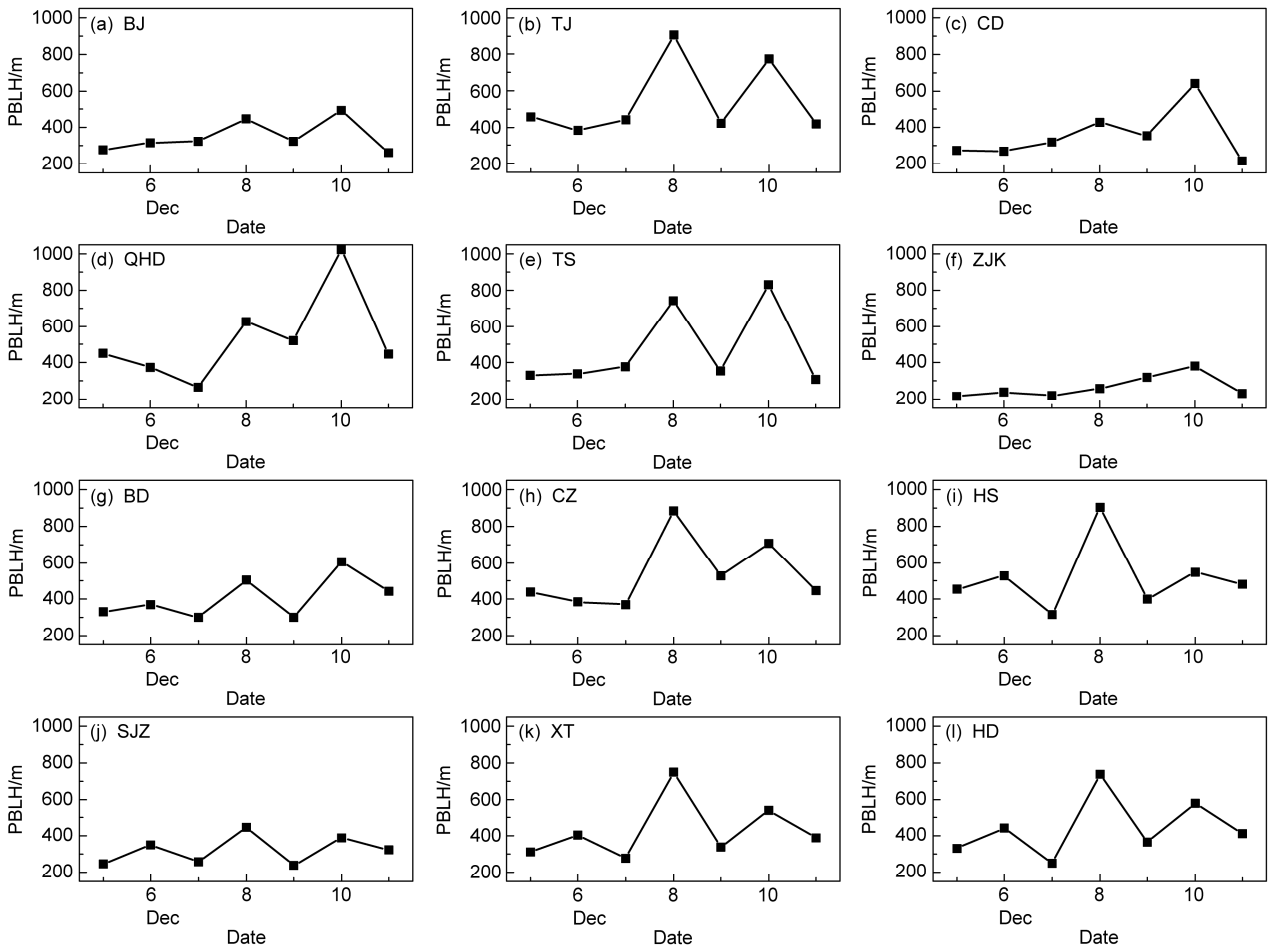

图 5 2015 年 12 月 5～10 日京津冀部分城市边界层高度（单位：m）模拟结果逐日变化

Fig. 5 Simulated PBLH (Planetary boundary layer height, units: m) in several cities in Beijing−Tianjin−Hebei during December 5–10, 2015

表 1 2015 年 12 月 5～10 日京津冀部分城市边界层高度模拟结果与风速模拟结果的平均值

Table 1 Averages of simulated PBLH (Planetary boundary layer height) and wind speed in several cities in Beijing−Tianjin−Hebei during December 5–10, 2015

	北京	天津	承德	秦皇岛	唐山	张家口	保定	沧州	衡水	石家庄	邢台	邯郸
平均边界层高度/m	364	565	382	544	495	271	403	553	526	321	437	452
平均风速/m s^{-1}	1.6	1.8	0.8	2.6	1.4	1.0	0.8	1.8	1.8	0.6	1.4	1.6

7～9 日，持续的东南风使京津冀东北部相对湿度维持在 70%～90%之间，京津冀中部成东北—西南向区域相对湿度较高。高湿地区呈现带状分布，与低能见度地区的带状分布较一致。12 月 10 日受东北风影响，京津冀地区相对湿度急剧下降，呈现出北部相对湿度低，南部相对湿度高的渐变状。图 6 中能见度也呈现出类似的分布。表 1 中给出了 12 个城市的过程平均风速，平均风速在 0.8～2.6 m s^{-1} 之间，除秦皇岛外，其余城市平均风速均小于 2 m s^{-1}。较低的风速不利于污染物的扩散。

3.4 模式能见度模拟值误差分析

选择北京、天津、邢台三个观测数据较全的站对其 12 月 5 日 00 时至 10 日 23 时进行统计分析(表 2)，$PM_{2.5}$ 质量浓度使用逐小时数据（可用观测数据数量：北京，1697；天津，565；邢台，570），相对湿度为逐 3 小时数据（可用观测数据数量：北京，48；天津，48；邢台，48），能见度为逐 3 小时数据（可用观测数据数量：北京，47；天津，44；邢台：47）。由表 2 可见，北京、天津 $PM_{2.5}$ 质量浓度模拟平均值高于观测平均值，平均偏差为 43

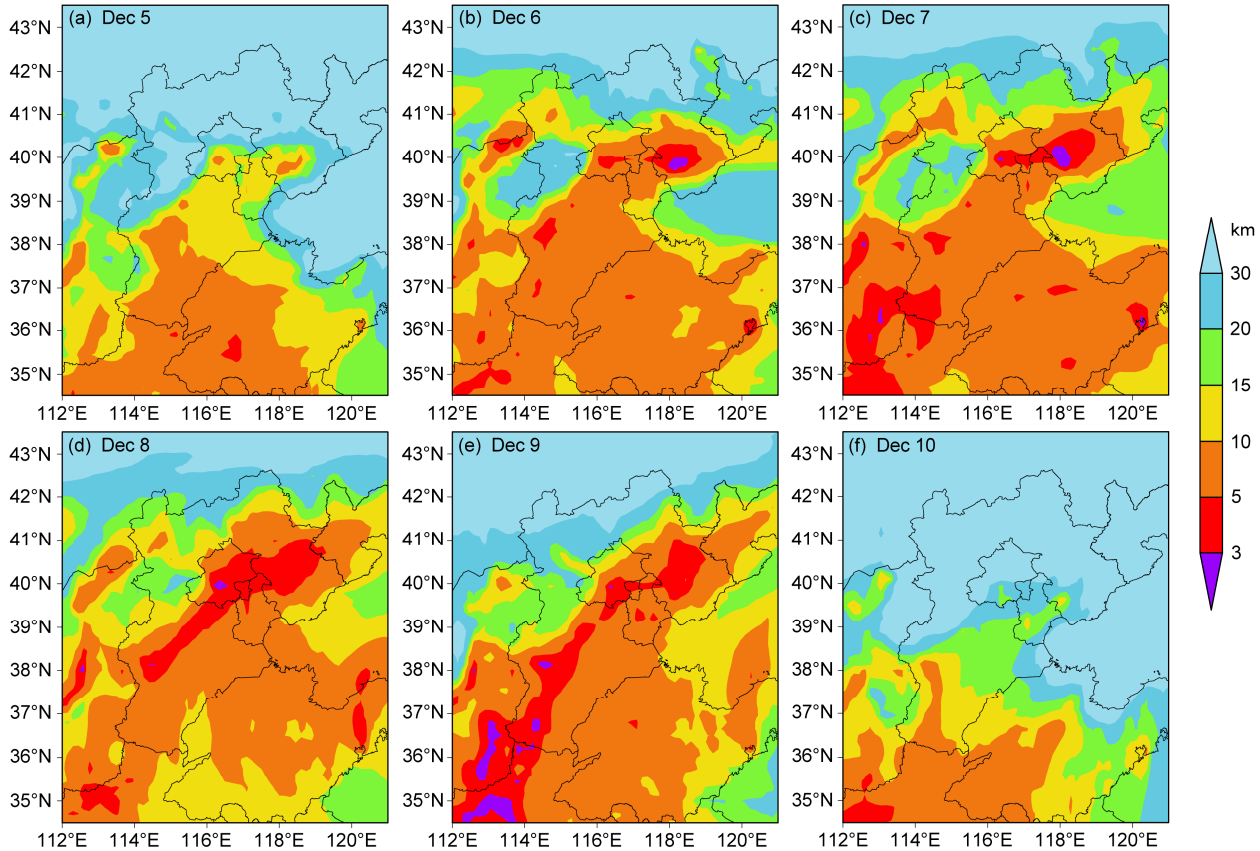

图 6　2015 年 12 月 5～10 日京津冀地区能见度模拟日平均区域分布

Fig. 6　Horizontal distributions of daily average visibility (simulation result, units: km) in Beijing−Tianjin−Hebei during December 5–10, 2015

μg m^{-3} 和 39 μg m^{-3}，相对误差为 28%和 33%。邢台观测平均值低于模拟平均值，相对误差为−27%。三地的相对湿度模拟平均值均低于观测值，相对误差分别为−21%、−26%和−22%。能见度过程模拟平均值高于观测平均值，相对误差较大，这可能与相对湿度模拟偏低有关。

表 2　2015 年 12 月 5～10 日 $PM_{2.5}$ 质量浓度、相对湿度、能见度的观测值和模拟值统计分析

Table 2　Statistical analysis of the simulated and observed $PM_{2.5}$ mass concentration, relative humidity, and visibility during December 5–10, 2015

		观测平均值	模拟平均值	平均偏差	相对误差
$PM_{2.5}$	北京	154 μg/m^3	197 μg/m^3	43 μg/m^3	28%
	天津	119 μg/m^3	158 μg/m^3	39 μg/m^3	33%
	邢台	264 μg/m^3	192 μg/m^3	−72 μg/m^3	−27%
相对湿度	北京	67%	54%	−14%	−21%
	天津	74%	55%	−19%	−26%
	邢台	73%	58%	−16%	−22%
能见度	北京	5 km	9 km	4 km	80%
	天津	5 km	10 km	5 km	100%
	邢台	5 km	7 km	2 km	40%

图 8 为北京、天津、承德、秦皇岛、唐山、张家口、保定和邢台 8 个站点观测值与模拟值 $PM_{2.5}$、相对湿度和能见度逐三小时对比。第一列为 $PM_{2.5}$ 的时间序列图，第二列为相对湿度时间序列图，第三列为能见度时间序列图。从 $PM_{2.5}$ 时间序列来看，各城市变化趋势较为一致，说明这是一次区域性污染过程。大部分时段模拟值与观测值的趋势变化较为吻合。但是模拟值的波动较大，北京（图 8a）9 日 18 时模式模拟的峰值明显高于观测值，天津（图 8b）、秦皇岛（图 8d）、唐山（图 8f）也有类似的情况，四个站都处于京津冀的东部，可能与风场的模拟有关。从相对湿度来看，模式能够较为准确地模拟出相对湿度的变化趋势，对相对湿度日内变化的变化特征也模拟的较好。但从数值上来说，大部分情况模拟值低于观测值，表 2 中的统计结果也说明了相同的情况，模式对相对湿度存在低估。从能见度来看，模式的模拟值有明显的日变化特征，且变化幅度较大，观测值的日变化幅度较小。能见度小于 5 km 时，模式模拟效果不佳。由 2.3 节公式（2）

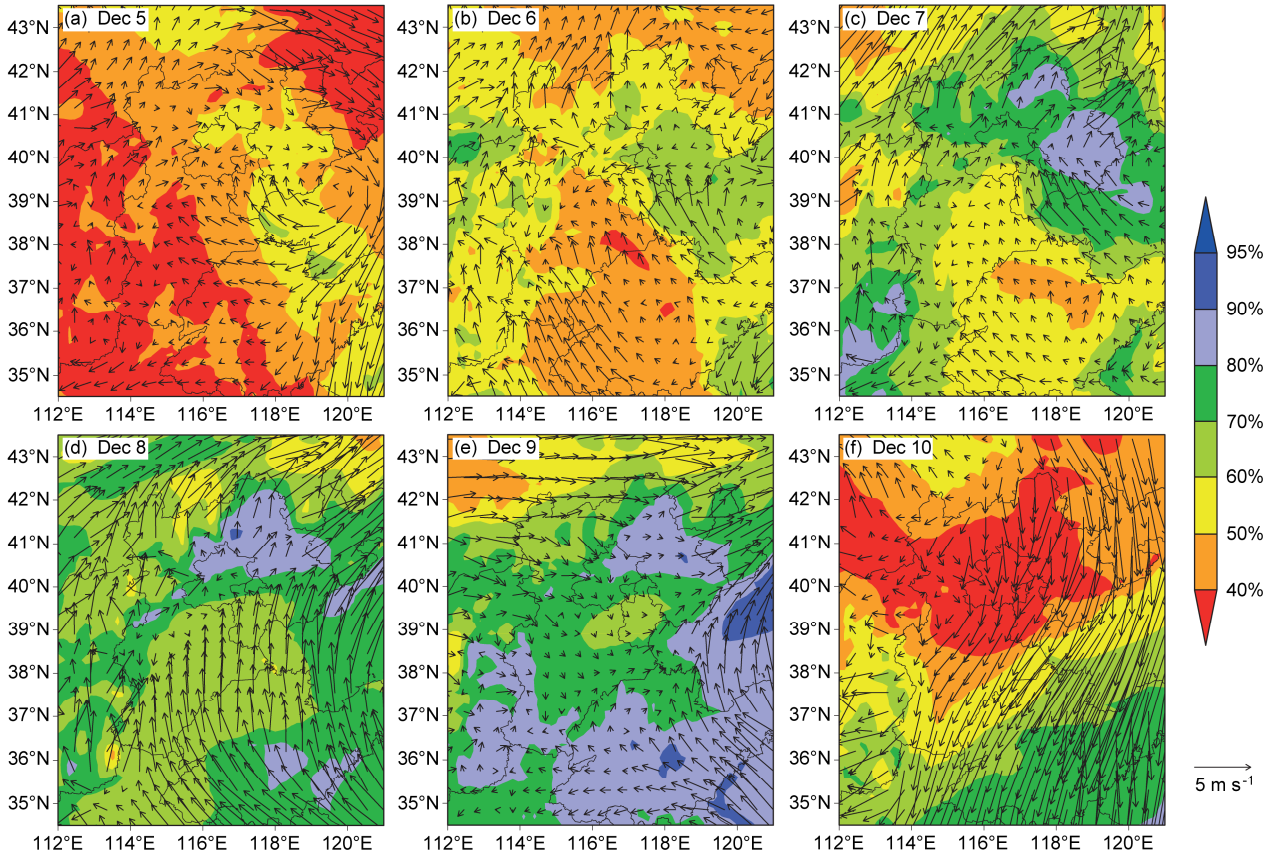

图 7 （a–f）2015 年 12 月 5～10 日京津冀地区模式模拟相对湿度（填色）、风速（矢量箭头，单位：m s^{-1}）日平均结果区域分布

Fig. 7 Simulated horizontal distributions of daily average relative humidity (shaded) and wind vectors (arrows; units: m s^{-1}) in Beijing–Tianjin–Hebeiduring (a–f) December 5–10, 2015

可知，当空气较干燥时，f(RH) 接近于 1；当空气湿润时，f(RH) 增大，[SO_4^{2-}]、[NO_3^-]前系数增大，b_{ext} 增长，能见度下降。从图 8 中可以发现，上述城市在 12 月 8～9 日出现了极低能见度的情况，而对应时段内的相对湿度均高于 80%，可见高相对湿度对低能见度有着相当大的影响。而模式中对于相对湿度的模拟存在整体性的低估，特别对于高相对湿度，这很可能是导致部分城市能见度模拟偏高的原因之一；对能见度模拟效果不佳还可能与模式使用的计算消光系数的公式有关。消光系数计算公式中 f (RH)是根据美国地区的统计结果得出，主要考虑细粒子的消光，没有考虑雾的消光。实际上水汽、雾滴本身会增强光的吸收作用和散射作用，使得能见度降低。直接使用该公式可能与京津冀的实际情况有一定差距，因此还需对能见度的算法以及水汽的算法做一定的改进。

图 9 列举了北京、天津、邢台三个城市的能见度、相对湿度、$PM_{2.5}$ 等要素的日均值，并将观测值与模拟值分列为两张图，可以更直观地对比不同要素之间的相互关系。

4 结论

本文利用 GRAPES_CUACE 模式对京津冀地区 2015 年 12 月重度雾霾过程进行了模拟和评估，针对 12 月 5～10 日的重污染天气过程，对地面风速、边界层高度、相对湿度、$PM_{2.5}$ 质量浓度及其对能见度的影响进行了详细分析。具体结论如下：

模式对京津冀地区能见度日变化趋势的模拟较好，但对京津冀地区能见度存在整体高估，特别对低能见度模拟值偏高。其中唐山、邢台模拟结果最佳。模式能比较准确地模拟京津冀地区 $PM_{2.5}$ 的日变化趋势和中心区域范围，但对 $PM_{2.5}$ 峰值的模拟存在着普遍偏低的情况。

重污染过程期间，较低的边界层高度和较低的风速不利于污染物的扩散。就 12 月 5～10 日的重污染天气过程而言，12 个城市的平均边界层高度低于

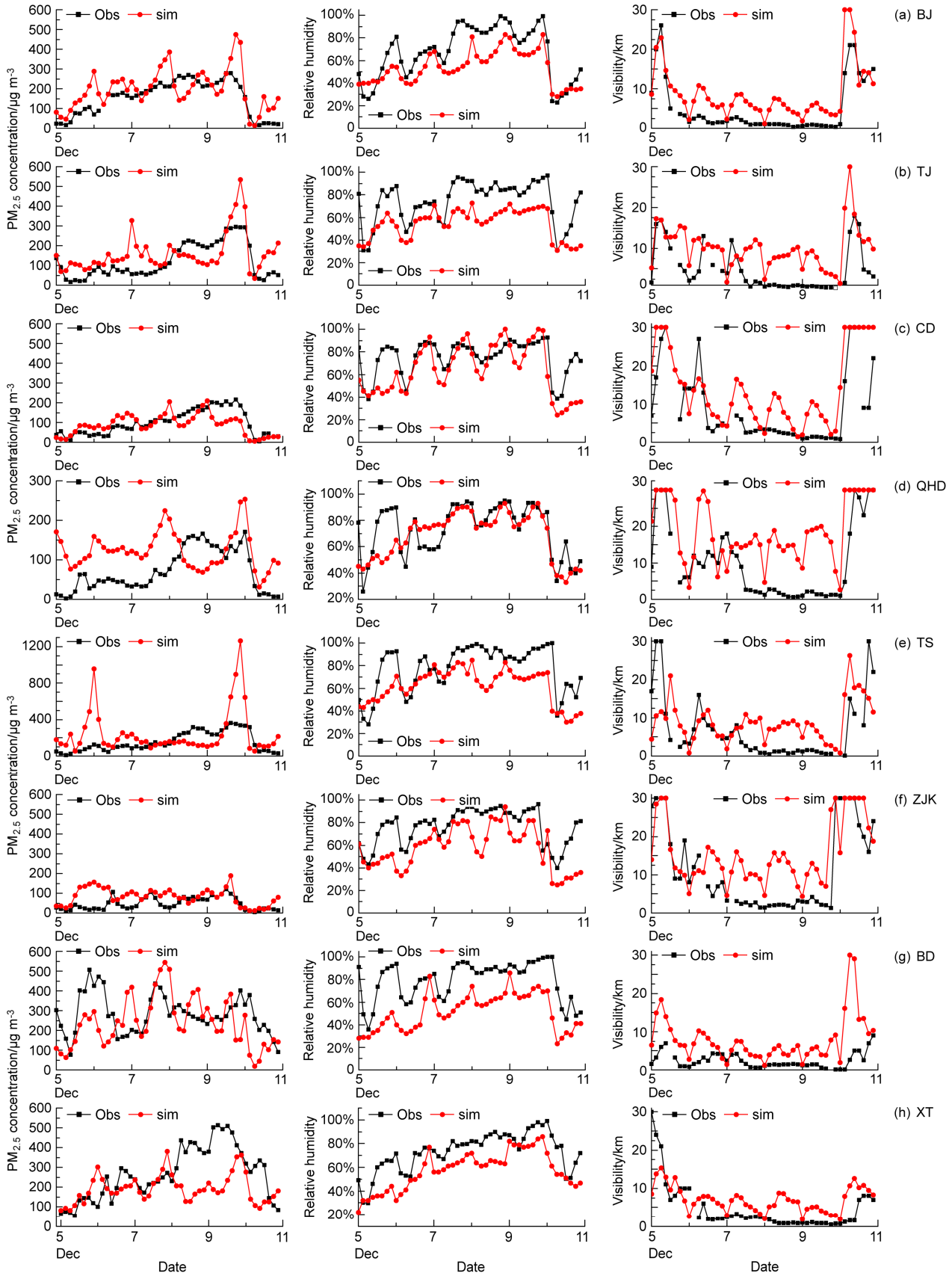

图 8 2015 年 12 月 5～10 日 $PM_{2.5}$ 质量浓度、相对湿度、能见度观测资料（黑线）与模拟结果（红线）的逐日变化

Fig. 8 Observed (Obs, black lines) and simulated (sim, red lines) daily averages of $PM_{2.5}$ mass concentration, relative humidity, visibility during December 5–10, 2015

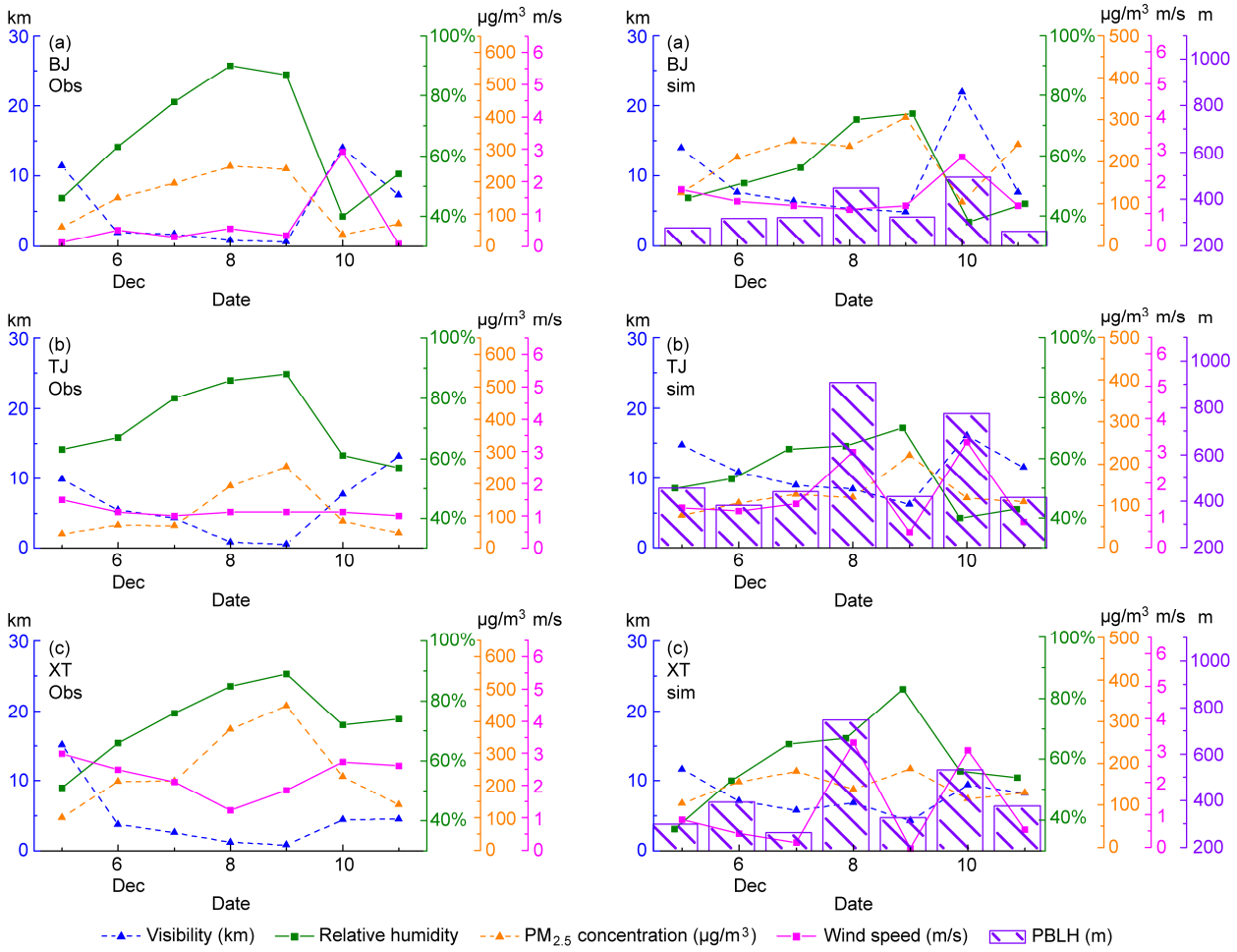

图 9 北京（BJ）、天津（TJ）、邢台(XT) 能见度、相对湿度、$PM_{2.5}$ 质量浓度、风速、边界层高度观测值与模拟值对比

Fig. 9 Observed and simulated daily averages of visibility, relative humidity, $PM_{2.5}$ mass concentration, wind speed, and PBLH in Beijing (BJ), Tianjin (TJ), and Xingtai (XT)

600 m; 除秦皇岛外，大部分城市平均风速低于 2 m s^{-1}。

通过分析能见度、相对湿度、$PM_{2.5}$ 之间的变化关系，发现模式模拟低能见度偏高可能与以下四个因素有关：（1）模式模拟重度雾霾期间的 $PM_{2.5}$ 极大值浓度偏低。（2）模拟相对湿度存在系统性偏低的误差，相对湿度会影响可溶性气溶胶的吸湿增长过程，从而影响气溶胶消光。（3）目前模式中采用的能见度参数化公式考虑了相对湿度对气溶胶吸湿增长的影响，没有考虑水汽饱和产生的雾滴的直接消光作用，这可能是能见度极低值漏报的重要原因之一。（4）目前模式中所用的基于美国观测资料的消光系数计算公式在中国的适用性有待进一步检验，特别是对于京津冀地区伴随高 $PM_{2.5}$、低能见度的重度雾霾天气，该公式需要改进。

尽管本文的模拟研究仅仅基于冬季一个月和一次重要雾霾过程，但研究结果表明，伴随高污染、高湿度的能见度预报是一个非常复杂的问题。本文的后续工作将在更长时间段，特别是冬夏的雾霾事件，对能见度的模拟和预报不确定性及其原因进行更为详细的研究，并力争根据中国东部地区观测数据对现有低能见度的预报公式进行一定修正，以改进模式对能见度的模拟效果。

参考文献（References）

An X Q, Sun Z B, Lin W L, et al. 2013. Emission inventory evaluation using observations of regional atmospheric background stations of China [J]. Journal of Environmental Sciences, 25 (3): 537–546, doi:10.1016/S1001-0742(12)60082-5.

Baik N J, Kim Y P, Moon K C. 1996. Visibility study in Seoul, 1993 [J]. Atmos. Environ., 30 (13): 2319–2328, doi:10.1016/1352-2310(95) 00443-2.

Boylan J W, Russell A G. 2006. PM and light extinction model performance metrics, goals, and criteria for three-dimensional air quality models [J]. Atmos. Environ., 40 (26): 4946–4959, doi:10.1016/j.atmosenv.2005.09.087.

曹伟华，梁旭东，李青春. 2013. 北京一次持续性雾霾过程的阶段性特

征及影响因子分析 [J]. 气象学报, 71 (5): 940–951. Cao Weihua, Liang Xudong, Li Qingchun. 2013. A study of the stageful characteristics and influencing factors of a long-lasting fog/haze event in Beijing [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 71 (5): 940–951, doi:10.11676/qxxb2013.072.

陈德辉, 沈学顺. 2006. 新一代数值预报系统 GRAPES 研究进展 [J]. 应用气象学报, 17 (6): 773–777. Chen Dehui, Shen Xueshun. 2006. Recent progress on GRAPES research and application [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 17 (6): 773–777, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2006.06.014.

陈德辉, 杨学胜, 张红亮, 等. 2003. 多尺度非静力通用模式框架的设计策略 [J]. 应用气象学报, 14 (4): 452–461. Chen Dehui, Yang Xuesheng, Zhang Hongliang, et al. 2003. Strategy for designing a non-hydrostatic multi-scale community model dynamic core [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 14 (4): 452–461, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2003.04.009.

陈德辉, 薛纪善, 杨学胜, 等. 2008. GRAPES 新一代全球/区域多尺度统一数值预报模式总体设计研究 [J]. 科学通报, 53 (20): 2396–2407. Chen Dehui, Xue Jishan, Yang Xuesheng, et al. 2008. New generation of multi-scale NWP system (GRAPES): General scientific design [J]. Chinese Science Bulletin, 53 (22): 3433–3445, doi:10.1007/s11434-008-0494-z.

邓涛, 吴兑, 邓雪娇, 等. 2013. 珠三角空气质量暨光化学烟雾数值预报系统 [J]. 环境科学与技术, 36 (4): 62–68. Deng Tao, Wu Dui, Deng Xuejiao, et al. 2013. Numerical forecast system of air quality photochemical smog over Pearl River Delta region [J]. Environmental Science & Technology (in Chinese), 36 (4): 62–68.

费建芳, 王锐, 王益柏, 等. 2009. 一次大雾天气下 $PM_{2.5}$ 二次无机粒子的数值模拟 [J]. 大气科学学报, 32 (3): 360–366. Fei Jianfang, Wang Rui, Wang Yibai, et al. 2009. A numerical analysis of secondary aerosol inorganic particles of $PM_{2.5}$ in a strong fog [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (3): 360–366, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2009.03.003.

高怡, 张美根. 2014. 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, 19 (2): 140–152. Gao Yi, Zhang Meigen. 2014. Numerical simulation of a heavy fog-haze episode over the North China Plain in January 2013 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (2): 140–152, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13135.

Gong S L, Zhang X Y. 2008. CUACE/Dust—An integrated system of observation and modeling systems for operational dust forecasting in Asia [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 8 (9): 2333–2340, doi:10.5194/acp-8-2333-2008.

韩素芹, 冯银厂, 边海, 等. 2008. 天津大气污染物日变化特征的 WRF-Chem 数值模拟 [J]. 中国环境科学, 28 (9): 828–832. Han Suqin, Feng Yinchang, Bian Hai, et al. 2008. Numerical simulation of diurnal variation of major pollutants with WRF-Chem model in Tianjin [J]. China Environmental Science (in Chinese), 28 (9): 828–832, doi:10.3321/j.issn:1000-6923.2008.09.012.

Han X, Zhang M G, Tao J H, et al. 2013. Modeling aerosol impacts on atmospheric visibility in Beijing with RAMS-CMAQ [J]. Atmos. Environ., 72: 177–191, doi:10.1016/j.atmosenv.2013.02.030.

Jiang C, Wang H, Zhao T, et al. 2015. Modeling study of $PM_{2.5}$ pollutant transport across cities in China's Jing–Jin–Ji region during a severe haze episode in December 2013 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 15 (3): 5803–5814, doi:10.5194/acp-15-5803-2015.

Koschmieder H. 1924. Theorie der horizontalen sichtweite [J]. Beitr. Phys. Freien Atm., 12: 33–53, 171–181.

蓝静, 陈柏纬, 范绍佳, 等. 2013. 香港地区一次低能见度事件的数值模拟研究 [J]. 热带气象学报, 29 (6): 993–1000. Lan Jing, Chan Baiwei, Fan Shaojia, et al. 2013. Numerical simulation of a low-visibility event in Hong Kong [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 29 (6): 993–1000.

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 Discussions, 15 (23): 34813–34869, doi:10.5194/acpd-15-34813-2015.

马志强, 赵秀娟, 孟伟, 等. 2012. 雾和霾对北京地区大气能见度影响对比分析 [J]. 环境科学研究, 25 (11): 1208–1214. Ma Zhiqiang, Zhao Xiujuan, Meng Wei, et al. 2012. Comparison of influence of fog and haze on visibility in Beijing [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 25 (11): 1208–1214.

Malm W C. 2000. Spatial and Seasonal Patterns and Temporal Variability of Haze and Its Constituents in the United States: Report III [R]. Fort Collins, CO: Cooperative Institute for Research in the Atmosphere Colorado State University.

盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 2013. 大气物理学（2 版） [M]. 北京: 北京大学出版社, 21. Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. 2013. Atmospheric Physics (2nd ed.) (in Chinese) [M]. Beijing: Peking University Press, 21.

Sisler J F, Malm W C. 1994. The relative importance of soluble aerosols to spatial and seasonal trends of impaired visibility in the United States [J]. Atmos. Environ., 28 (5): 851–862, doi:10.1016/1352-2310(94)90244-5.

宋宇, 唐孝炎, 方晨, 等. 2003. 北京市能见度下降与颗粒物污染的关系 [J]. 环境科学学报, 23 (4): 468–471. Song Yu, Tang Xiaoyan, Fang Chen, et al. 2003. Relationship between the visibility degradation and particle pollution in Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 23 (4): 468–471, doi:10.3321/j.issn:0253-2468.2003.04.011.

Stoelinga M T, Warner T T. 1999. Nonhydrostatic, mesobeta-scale model simulations of cloud ceiling and visibility for an East Coast winter precipitation event [J]. J. Appl. Meteor., 38 (4): 385–404, doi:10.1175/1520-0450(1999)038<0385:NMSMSO>2.0.CO;2.

孙彧, 马振峰, 牛涛, 等. 2013. 最近 40 年中国雾日数和霾日数的气候变化特征 [J]. 气候与环境研究, 18 (3): 397–406. Sun Yu, Ma Zhenfeng, Niu Tao, et al. 2013. Characteristics of climate change with respect to fog days and haze days in China in the past 40 years [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (3): 397–406, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12170.

Tao M H, Chen L F, Su L, et al. 2012. Satellite observation of regional haze pollution over the North China Plain [J]. J. Geophys. Res., 117 (D12): D12203, doi:10.1029/2012JD017915.

U.S. Environmental Protection Agency. 2003. Guidance for estimating natural visibility conditions under the regional haze program [R]. EPA-454/B-03-005.

王宏, 龚山陵, 张红亮, 等. 2009. 新一代沙尘天气预报系统 GRAPES_

CUACE/Dust: 模式建立、检验和数值模拟 [J]. 科学通报, 54 (24): 3878–3891. Wang Hong, Gong Shanling, Zhang Hongliang, et al. 2010. A new-generation sand and dust storm forecasting system GRAPES_CUACE/Dust: Model development, verification and numerical simulation [J]. Chinese Science Bulletin, 55 (7): 635–649, doi:10.1007/s11434-009-0481-z.

Wang H, Shi G Y, Jing Z, et al. 2013. Case study of longwave contribution to dust radiative effects over East Asia [J]. Chinese Science Bulletin, 58 (30): 3673–3681, doi:10.1007/s11434-013-5752-z.

Wang H, Xue M, Zhang X Y, et al. 2015a. Mesoscale modeling study of the interactions between aerosols and PBL meteorology during a haze episode in Jing–Jin–Ji (China) and its nearby surrounding region. Part 1: Aerosol distributions and meteorological features [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 15 (6): 3257–3275, doi:10.5194/acp-15-3257- 2015.

Wang H, Shi G Y, Zhang X Y, et al. 2015b. Mesoscale modelling study of the interactions between aerosols and PBL meteorology during a haze episode in China Jing–Jin–Ji and its near surrounding region. Part 2: Aerosols' radiative feedback effects [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 15 (6): 3277–3287, doi:10.5194/acp-15-3277-2015.

王京丽, 刘旭林. 2006. 北京市大气细粒子质量浓度与能见度定量关系初探 [J]. 气象学报, 64 (2): 221–228. Wang Jingli, Liu Xulin. 2006. The discuss on relationship between visibility and mass concentration of $PM_{2.5}$ in Beijing [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 64 (2): 221–228, doi:10.11676/qxxb2006.022.

王亚强, 吕岩, 曹国良. 2014. 排放源处理系统的研发和应用 [C]// 中国气象学会. 第 31 届中国气象学会年会 S6 大气成分与天气、气候变化. 北京: 中国气象学会. Wang Yaqiang, Lü Yan, Cao Guoliang. 2014. The development and application of air pollutant emission source processing system [C]// Chinese Meteorological Society. Annual Meeting S6 Atmospheric Composition and the Weather and Climate Change (in Chinese). Beijing: Chinese Meteorological Society.

吴兑. 2011. 灰霾天气的形成与演化 [J]. 环境科学与技术, 34 (3): 157–161. Wu Dui. 2011. Formation and evolution of haze weather [J]. Environmental Science & Technology (in Chinese), 34 (3): 157–161, doi:10.3969/j.issn.1003-6504.2011.03.036.

徐国强, 陈德辉, 薛纪善, 等. 2008. GRAPES 物理过程的优化试验及程序结构设计 [J]. 科学通报, 53 (20): 2428–2434. Xu Guoqiang, Chen Dehui, Xue Jishan, et al. 2008. The program structure designing and optimizing tests of GRAPES physics [J]. Chinese Science Bulletin, 53 (22): 3470–3476, doi:10.1007/s11434-008-0418-y.

薛纪善, 庄世宇, 朱国富, 等. 2008. GRAPES 新一代全球/区域变分同化系统研究 [J]. 科学通报, 53 (20): 2408–2417. Xue Jishan, Zhuang Shiyu, Zhu Guofu, et al. 2008. Scientific design and preliminary results of three-dimensional variational data assimilation system of GRAPES [J]. Chinese Science Bulletin, 53 (22): 3446–3457, doi:10.1007/s11434-008-0416-0.

杨军, 李子华, 黄世鸿. 1999. 相对湿度对大气气溶胶粒子短波辐射特性的影响 [J]. 大气科学, 23 (2): 239–247. Yang Jun, Li Zihua, Huang Shihong. 1999. Influence of relative humidity on shortwave radiative properties of atmospheric aerosol particles [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 23 (2): 239–247, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1999.02.13.

Yang X S, Chen J B, Hu J L, et al. 2007. A semi-implicit semi-Lagrangian global nonhydrostatic model and the polar discretization scheme [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 50 (12): 1885–1891, doi:10.1007/s11430-007-0124-7.

Yang X S, Hu J L, Chen D H, et al. 2008. Verification of GRAPES unified global and regional numerical weather prediction model dynamic core [J]. Chinese Science Bulletin, 53 (22): 3458–3464, doi:10.1007/s11434-008-0417-z.

于凤莲, 刘东贤, 胡英. 2002. 有关气溶胶细粒子对城市能见度影响的研究 [J]. 气象科技, 30 (6): 379–383. Yu Fenglian, Liu Dongxian, Hu Ying. 2002. Study on the influence of aerosol fine particles on urban visibility [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 30 (6): 379–383, doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2002.06.014.

章澄昌, 周文贤. 1995. 大气气溶胶教程 [M]. 气象出版社, 328pp. Zhang Chengchang, Zhou Wenxian. 1995. The Lecture of Atmospheric Aerosol (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 328pp.

Zhang Q H, Zhang J P, Xue H W. 2010. The challenge of improving visibility in Beijing [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 10 (16): 7821–7827, doi:10.5194/acp-10-7821-2010.

Zhang R H, Shen X S. 2008. On the development of the GRAPES—A new generation of the national operational NWP system in China [J]. Chinese Science Bulletin, 53 (22): 3429–3432, doi:10.1007/s11434-008-0462-7.

张小玲, 唐宜西, 熊亚军, 等. 2014. 华北平原一次严重区域雾霾天气分析与数值预报试验 [J]. 中国科学院大学学报, 31 (3): 337–344. Zhang Xiaoling, Tang Yixi, Xiong Yajun, et al. 2014. Analysis and numerical forecast of a regional fog-haze in North China Plain [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences (in Chinese), 31 (3): 337–344, doi:10.7523/j.issn.2095-6134.2014.03.007.

赵建华, 李耀辉, 蒲朝霞, 等. 2012. GRAPES 沙尘数值预报系统对一次沙尘暴沙尘浓度同化模拟试验分析 [J]. 高原气象, 31 (3): 697–705. Zhao Jianhua, Li Yaohui, Pu Zhaoxia, et al. 2012. Model-experimental analysis of variational assimilation of dust concentration with GRAPES sand-dust numerical forecasting system in a sand-dust storm [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 31 (3): 697–705.

Zhou C H, Gong S L, Zhang X Y, et al. 2008. Development and evaluation of an operational SDS forecasting system for East Asia: CUACE/DUST [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 8 (4): 787–798, doi:10.5194/acp-8-787-2008.

周淑贞, 张超. 1985. 城市气候学导论 [M]. 上海: 华东师范大学出版社, 196. Zhou Shuzhen, Zhang Chao. 1985. Urban Climatology Introduction (in Chinese) [M]. Shanghai: East China Normal University Press, 196.

朱国富, 薛纪善, 张华, 等. 2008. GRAPES 变分同化系统中卫星辐射率资料的直接同化 [J]. 科学通报, 53 (20): 2424–2427. Zhu Guofu, Xue Jishan, Zhang Hua, et al. 2008. Direct assimilation of satellite radiance data in GRAPES variational assimilation system [J]. Chinese Science Bulletin, 53 (22): 3465–3469, doi:10.1007/s11434-008-0419-x.

庄世宇, 薛纪善, 朱国富, 等. 2005. GRAPES 全球三维变分同化系统——基本设计方案与理想试验 [J]. 大气科学, 29 (6): 872–884. Zhuang Shiyu, Xue Jishan, Zhu Guofu, et al. 2005. GRAPES global 3D-var system—Basic scheme design and single observation test [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29(6): 872–884, doi:10.3878/j.issn. 1006-9895.2005.06.04.