

韩霄, 张美根. 2014. 2013年1月华北平原重霾成因模拟分析 [J]. 气候与环境研究, 19 (2): 127–139, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13136. Han Xiao, Zhang Meigen. 2014. Model analysis of haze formation over the North China Plain in January 2013 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (2): 127–139.

2013年1月华北平原重霾成因模拟分析

韩霄 张美根

中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

摘要 2013年1月华北平原出现了罕见的重污染天气过程, 并引发连续多天大范围重霾现象。利用中华人民共和国环境保护部公布的空气污染指数日值数据和气象常规观测数据, 结合区域空气质量模式系统 RAMS-CMAQ 的模拟结果, 对1月10~15日污染过程的气象要素和关键气溶胶物种时空分布特征进行了详细分析, 并对灰霾成因进行了探讨。结果表明, 受本次污染过程影响的区域主要分布在北京—天津—唐山、河北省中南部和山东省大部。这些地区细颗粒物(即PM2.5)日均质量浓度超过 $120 \mu\text{g m}^{-3}$, 且基本被灰霾覆盖, 日均能见度在5~8 km之间。其中在北京、天津、石家庄和济南市及周边地区细颗粒物日均质量浓度可达 $250\sim300 \mu\text{g m}^{-3}$, 部分市区可超过 $300 \mu\text{g m}^{-3}$, 而日均能见度则可下降至3 km以下, 形成重度灰霾。此外, 对气象场的分析显示, 本次污染过程期间华北平原大部分地区水平风速较多年平均值偏小约20%, 且有明显逆温层覆盖, 北京—天津—唐山、河北省南部和山东省北部的相对湿度则较多年平均值偏高达10%~40%。这样的气象条件不仅造成污染物易于堆积, 而且有利于吸湿性粒子消光效应的快速增长, 使能见度明显下降, 是引发灰霾的重要因素之一。在北京地区引发灰霾的主要气溶胶物种为硫酸盐、硝酸盐和铵盐, 这3种无机盐对近地面的消光贡献率达到50%以上。其中硝酸盐的消光贡献比率最高, 可达总体效应的1/4, 表明在这次污染过程中除相关工业源排放外, 交通源排放也是北京地区主要的污染源之一。

关键词 灰霾 能见度 华北平原 气象场 CMAQ (Community Multi-scale Air Quality modeling system)

文章编号 1006-9585 (2014) 02-0127-13

中图分类号 X16

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13136

Model Analysis of Haze Formation over the North China Plain in January 2013

HAN Xiao and ZHANG Meigen

State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Heavy air pollution accompanied by widespread haze clouds occurred in January 2013 over the North China Plain (NCP). To investigate the controlling factors of the haze formation during the study period of 10–15 January 2013, the air quality modeling system RAMS-CMAQ and multiple observation data including routine weather measurements and the air pollution index (API) released by the Ministry of Environment Protection of China were applied to analyze the temporal and spatial variation features of the meteorological factors and key aerosol components. The simulation results show that a high mass burden of PM2.5, which was higher than the $120 \mu\text{g m}^{-3}$ generally distributed in the Beijing–Tianjin–Tangshan region, central and south Hebei Province, and most parts of the Shandong Province. The visibility over these regions broadly ranged from 5 to 8 km. Furthermore, the mass burden of PM2.5 reached $250\sim300 \mu\text{g m}^{-3}$.

收稿日期 2013-08-06 收到, 2013-12-16 收到修定稿

资助项目 中国科学院战略性先导科技专项 XDB05030102、XDB05030103、XDB05030105, 国家自然科学基金项目 41105106

作者简介 韩霄, 男, 1982年出生, 博士, 副研究员, 主要从事气溶胶区域环境和气候效应数值模拟研究。E-mail: hanxiao@mail.iap.ac.cn

通讯作者 张美根, E-mail: mgzhang@mail.iap.ac.cn

m^{-3} over Beijing, Tianjin, Shijiazhuang, Jinan, and their surrounding regions and exceeded $300 \mu\text{g m}^{-3}$ over their urban areas. Thus, the visibility dropped to 3 km and formed severe haze clouds over these cities. Analysis of the meteorological field shows that compared with the multi-year average, the horizontal wind speed and relative humidity at the surface decreased approximately 20% and increased 10%–40%, respectively, over the Beijing–Tianjin–Tangshan region, central and south Hebei Province, and northern Shandong Province during this pollution episode. Coupled with temperature inversion, these stable atmospheric conditions were favorable for pollutant accumulation, and the extinction ability of soluble particles was significantly enhanced due to the high relative humidity. Thus, the abnormal meteorological field was a primary reason for the haze formation in January 2013 over the NCP. Sulfate, nitrate, and ammonium were the main aerosol components responsible for the haze formation in Beijing. The contribution of these three types of inorganic salts to the total extinction exceeded 50%. Additionally, the nitrate provided the first contribution to the surface extinction at more than 25%, which implies that emissions from the transportation sector, in addition related industry sectors, were major anthropogenic sources of this pollution episode in Beijing.

Keywords Haze, Visibility, North China Plain, Meteorological field, CMAQ (Community Multi-scale Air Quality modeling system)

1 引言

近年来,随着经济高速增长和人口增加,我国东部地区大气污染物排放明显加剧,并造成以长三角、珠三角和华北平原为主的大范围能见度下降(Che et al., 2007)及区域性灰霾频繁发生。就华北平原而言,王喜全等(2013)、Zhao et al. (2011)通过分析北京—天津—唐山地区灰霾天气年代变化和能见度变化趋势,揭示近20年华北地区大城市群灰霾天数急剧增加。此外,近期有许多研究对华北地区灰霾过程中气溶胶粒子的成分、粒子谱分布特征进行了观测和详细的分析(Sun et al., 2006; Quan et al., 2011; Yu et al., 2011),结果表明造成该地区灰霾发生的大气污染物成分极其复杂、来源广泛,且受局地气象因素影响明显。对华北地区污染的长期卫星监测资料则显示近年来该地区灰霾影响具有区域性特征,而不再仅仅局限于城市等人为活动密集的地区(Tao et al., 2012)。

2013年1月,华北平原北京—天津—唐山、石家庄周边及山东省中北部出现了本世纪以来罕见的重污染天气过程,并引发连续多天的重度灰霾。根据中国气象局能见度监测资料([http://www.cma.gov.cn/2011qxfw/2011qsjgx\[2013-08-01\]](http://www.cma.gov.cn/2011qxfw/2011qsjgx[2013-08-01]))显示,北京、天津、石家庄和济南在1月能见度低于10 km的天数分别达到了14 d、19 d、24 d和17 d。这次连续性重污染过程对华北平原经济生产、交通和居民健康均造成了非常显著的影响,并由此引起了国内外社会和科学界的广泛关注和讨论,也为我国目前所面临的大气环境状况敲响了警钟。灰霾期间首

要污染物为细颗粒物(即PM2.5)及粗颗粒物(即PM10)。根据中华人民共和国环境保护部发布的相关信息,自1月10日开始,包括北京、天津、石家庄、济南等城市的中东部地区颗粒物质量浓度均居高不下:北京市细颗粒物小时浓度连续数日超过国家空气质量二级标准($75 \mu\text{g/m}^3$),峰值最高可达 $700 \mu\text{g/m}^3$ 以上,颗粒物产生的消光作用使部分地区能见度不足200 m(http://www.mep.gov.cn/zhxx/hjyw/201301/t20130115_245148.htm[2013-01-15]);石家庄和济南6~16日细颗粒物质量浓度平均值也分别可达约 $350 \mu\text{g m}^{-3}$ 和 $150 \mu\text{g m}^{-3}$ (张小曳等,2013)。直至15日夜间冷空气南下才使得污染物加速扩散,灰霾天气明显减弱。此外,有研究表明2013年1月天气条件异常,由于南下冷空气强度较弱、位置偏北,加之我国中东部上空处于弱脊或平直的西风带中,形成稳定的大气环流形势,非常不利于大气污染物扩散(关月和何立富,2013);而全月降水日虽多,但量级小,这样的弱降水不但不足以净化空气,反而增加了地面相对湿度,为颗粒物湿增长创造了有利条件,并进而导致灰霾持续加强(王从梅等,2013)。由此可见,本次灰霾天气的形成有着复杂的背景原因,需要利用多种研究手段及数据进行综合分析。因此,本文选取华北地区地面台站气象要素监测数据及环境保护部公布的主要城市空气污染指数(Air Pollution Index, API),结合区域空气质量模式系统RAMS-CMAQ(Regional Atmospheric Modeling System-Community Multi-scale Air Quality)的模拟结果,对这次罕见灰霾过程中多种气象要素、污染物和能见度的时空分布特征进行了定量分析研究,并对灰霾形成

的主要原因进行了综合探讨。

2 模式系统介绍

区域空气质量模式系统 RAMS-CMAQ 在美国环保局多尺度空气质量模式 CMAQ (版本 4.6) 的基础上发展起来 (Zhang et al., 2002), 利用其对大气痕量气体及多种主要气溶胶物种的物化演变和时空分布进行模拟。在模式系统中, 使用了最新版 CB05 (Carbon Bond Mechanism) 模块 (Sarwar et al., 2008) 模拟气相化学, 包括氮氧化物和挥发性有机物在大气中的复杂演化过程; 另外使用 ISORROPIA (Nenes et al., 1999) 模块模拟气一粒转化过程。气溶胶在大气中的碰并、凝结和增长则使用区域颗粒物模块 (Regional Particulate Model) 进行描述。模式系统模拟的气溶胶物种包括: 硫酸盐、硝酸盐、铵盐、黑碳、有机碳、沙尘和海盐, 并将气溶胶粒子按粒径大小分为 3 个模态: 埃根核、聚集态和粗粒子模态。每个模态内为内部混合, 模态之间为外部混合。模式系统使用 RAMS 提供模拟气象场, 使用高度地形追随坐标, 使其能够对下垫面及大气边界层有更为细致的描述 (Cotton et al., 2003), 提高对边界层内大气污染物模拟的准确性。此外, 还将一个气溶胶光学特性模块 (Han et al., 2013) 与模式系统耦合, 用以模拟气溶胶光学特性和水平能见度。该模块采用 Maxwell-Garnett 混合理论 (Chuang et al., 2002) 描述由内部混合过程引起的颗粒物折射指数变化, 并基于 Kohler 理论计算不同粒子的湿

半径, 使其能够全面考虑各种可能影响气溶胶粒子消光特性的因子, 包括入射波长、粒子尺度谱分布、湿增长特性及内部混合过程等。此外, 引入 Chebyshev 多项式拟合方法, 在保证计算准确性的前提下, 可大大减少计算量, 并允许模块依据外部环境的变化实时计算粒子的相关微物理参数, 提高模拟的准确性。在得到气溶胶消光特性后, 利用以下公式计算水平能见度

$$V_{IS}=3.912/\beta, \quad (1)$$

其中, V_{IS} 代表能见度, β 代表气溶胶消光系数。

模式系统使用的人为排放源主要取自 Lu et al. (2011) 2010 年亚洲地区排放源数据, 水平分辨率为 0.25° (纬度) $\times 0.25^{\circ}$ (经度), 分为电场、工业源、民用源和交通源; 此外, 森林火灾、秸秆焚烧、农业活动产生的含碳气溶胶排放和 NH_3 排放数据分别取自 GFEDv2.1 (Global Fire Emissions Database, Version 2; <http://dx.doi.org/10.3334/ORNLDAAC/849> [2013-02-20]) 和 REAS (Regional Emission inventory for Asia domain; <http://www.jamstec.go.jp/frsgc/research/d4/emission.htm> [2013-08-01])。模式系统采用双重嵌套网格 (图 1), 外层网格 (中心点 $35^{\circ}N$, $116^{\circ}E$; 水平分辨率 64 km) 覆盖东亚地区, 并为内层网格提供实时边界条件; 内层模拟区域覆盖了华北平原的主要地区, 水平分辨率 16 km, 在水平方向上有 94×90 个网格点, 中心点为 ($40^{\circ}N$, $116^{\circ}E$)。垂直方向从地面至约 23 km 分为 15 层, 有近一半分配在 2 km 以下以便更好地描述大气边界层。该模式系统已多次应用于对东亚及华北地区关键气

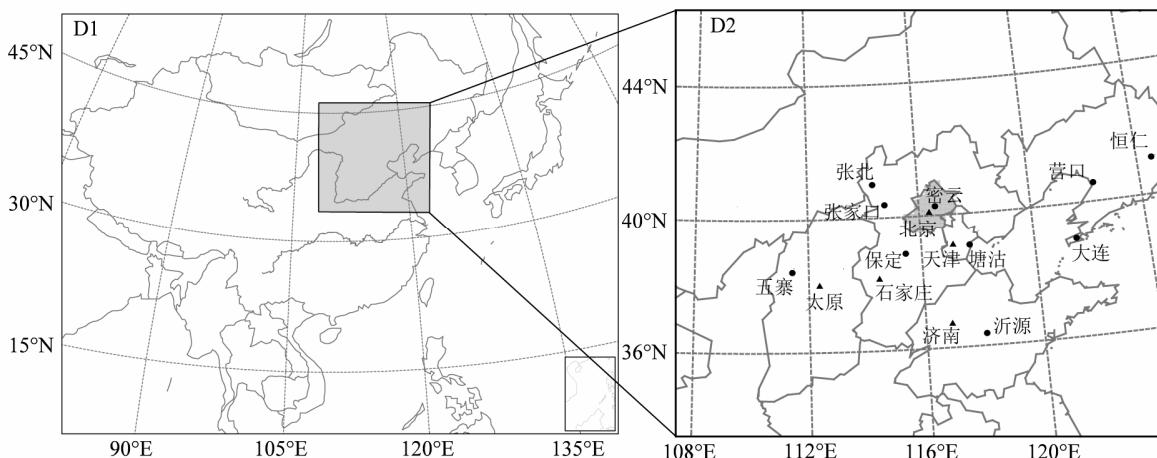


图 1 模式使用的双层嵌套网格覆盖区域 (D1 为外层网格; D2 为内层网格, 标出了使用的地基测站位置)

Fig. 1 The model domains used in this study (D1 and D2 are the outer frame and inside frame, respectively, the geographic locations of the observation sites in D2 are also shown)

溶胶时空分布、气候和环境效应的模拟工作 (Zhang et al., 2005, 2006, 2007; Han et al., 2011, 2013), 并被证明具有良好的模拟效果。本次模拟时段选择为 2012 年 12 月 25 日至 2013 年 1 月 31 日, 并集中对 1 月 10~15 日的重污染过程进行了分析。

3 模拟结果评估

首先, 对模式模拟的气象要素进行了评估。观测数据取自中国气象局地面气候资料日值数据集 (<http://www.cma.gov.cn/2011qxfw/2011qsjgx> [2013-08-01])。从图 2 可以看出, 模拟温度与观测资料基本吻合。模拟相对湿度与观测值也有很好的对应 (见图 3), 模拟结果基本上可以较好地再现观测值的大小和变化趋势, 尤其是 1 月 10~15 日在塘沽、密云和沂源出现的相对湿度高值。此外, 模拟风速

与不同站点的观测风速值也比较一致 (见图 4)。而图 5 中模拟与观测的风向在总体变化趋势上也基本相符, 虽然在某些站点和某些时段 (如密云站 10~15 日) 二者存在较明显背离, 但这有可能是由于模拟结果 (小时值) 与观测数据 (每 10 min 取值) 在时间分辨率上存在的差异所造成。其次, 图 6 为 2013 年 1 月模拟近地面 PM10 粒子质量浓度及能见度与观测数据的比较结果。其中 PM10 观测数据取自环境保护部公布的日均 API (<http://datacenter.mep.gov.cn> [2013-02-01]) 数据计算得到, 二者之间的关系可表述为当 PM10 质量浓度处于 API 级别 I_i 和 I_j 之间时:

$$C = \frac{C_i - C_j}{I_i - I_j} (I - I_j) + C_j, \quad (2)$$

其中, C 为 PM10 质量浓度, C_i 和 C_j 分别为表 1 中给出的与 API 级别 I_i 和 I_j 所对应的 PM10 质量浓度,

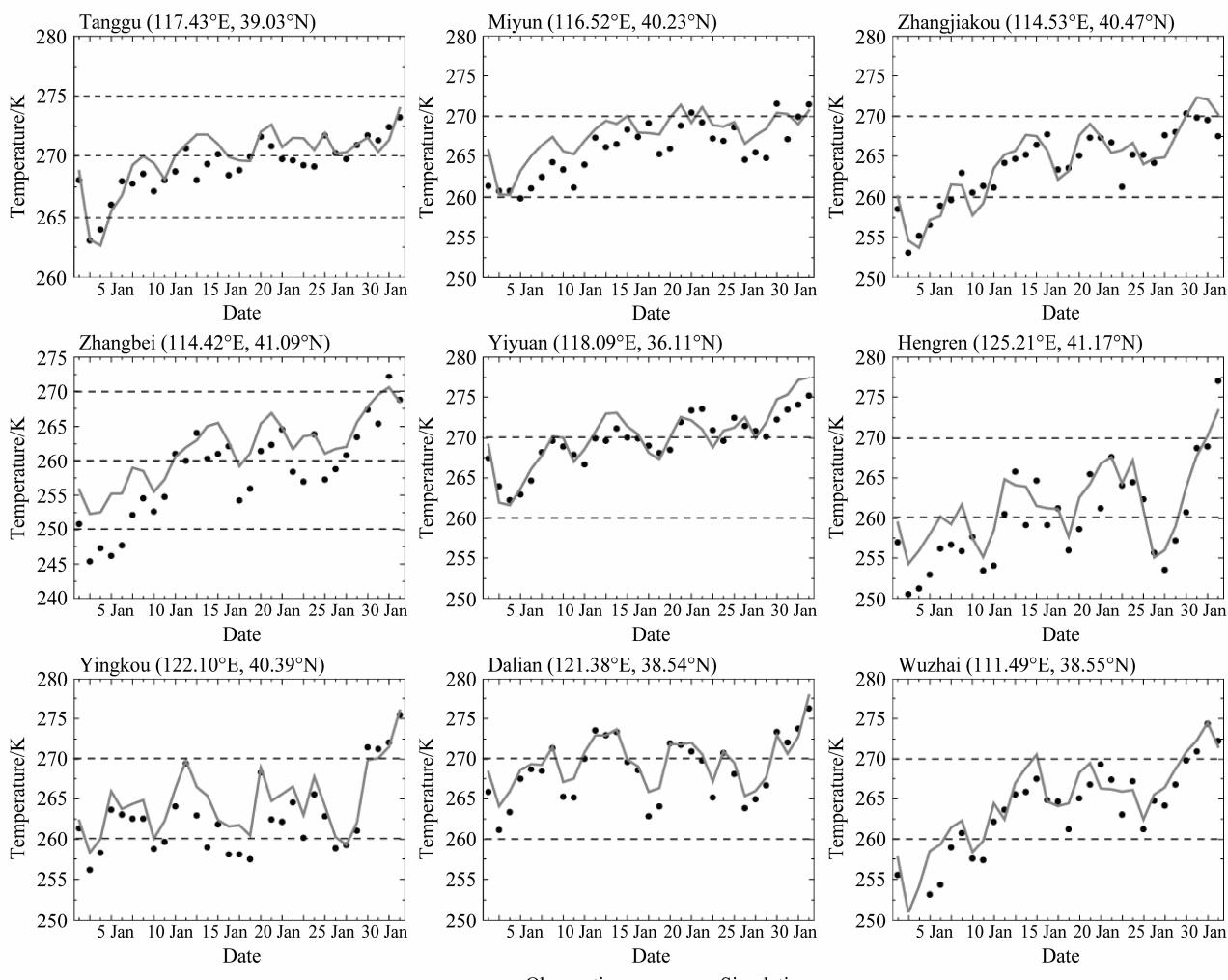


图 2 2013 年 1 月日均近地面温度观测资料与模拟结果比较

Fig. 2 Observed and modeled daily averaged temperature in Jan 2013

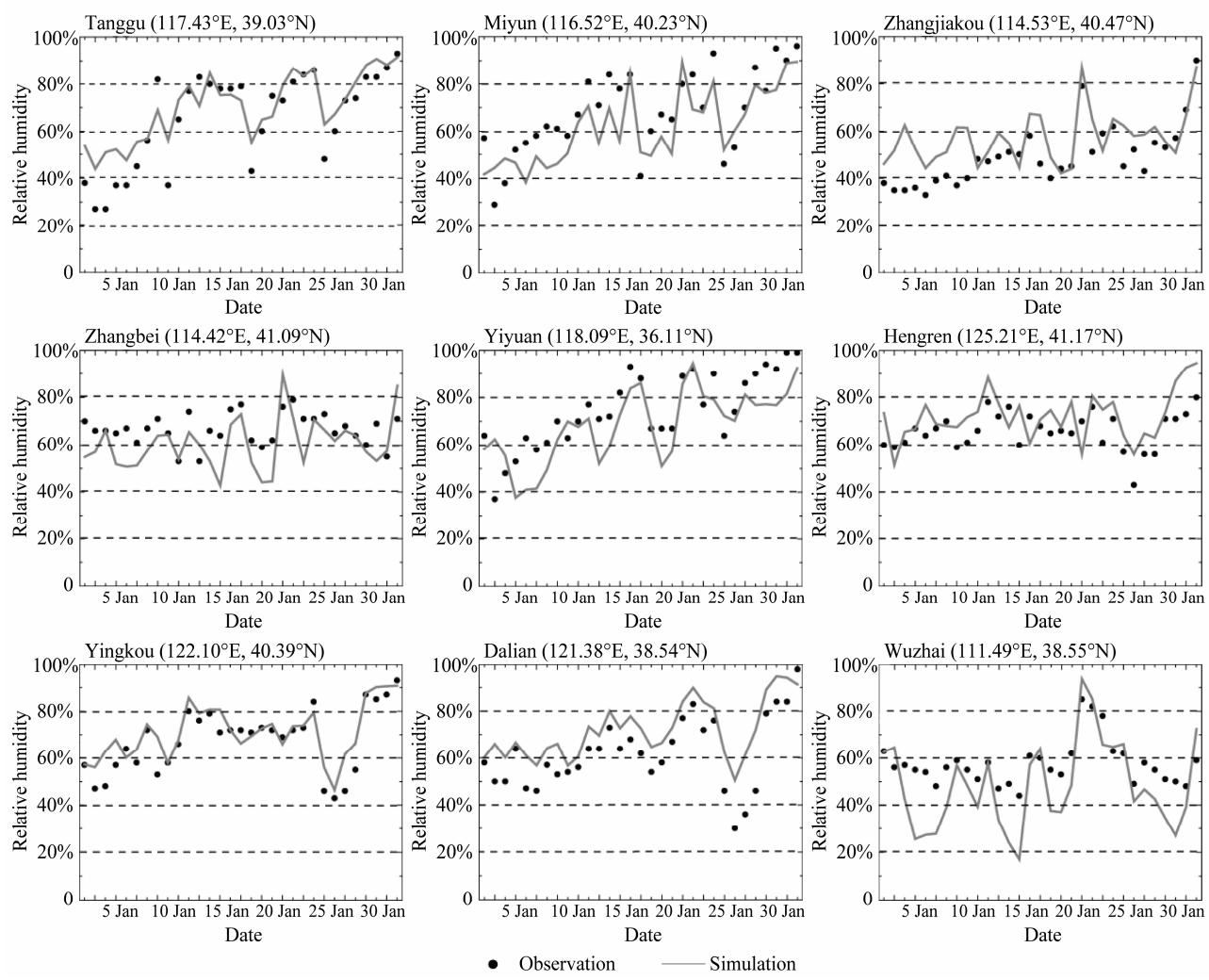


图3 同图2, 但为相对湿度

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for relative humidity

I 为 API。需要说明的是, API 上限设定为 500, 对应的 PM10 质量浓度为 $600 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。目前, 环境保护部公布的华北平原主要城市 API 数据只到 2013 年 1 月 14 日, 虽然无法收集 1 月全月数据, 但基本涵盖了本文关注的主要污染时段。从图 6a-f 可以看出, 模拟结果的变化趋势与观测资料有较好的一致性, 尤其能够表现 1 月 10~14 日的高值。但当 PM10 质量浓度高于 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时, 模拟结果在一定程度上均低于观测值。这种低估在其他类似数值模拟研究中也同样存在 (Wu et al., 2011), 主要原因是目前对于我国城市地区由交通、基建等人为活动产生的粗颗粒物排放量估算仍存在很多的不确定性, 相关排放源数据相对欠缺 (Zhang et al., 2009)。图 6g-i 中能见度观测数据取自中国气象局地面气候资料日值数据集。需要指出的是该数据集公布的能见度资料为北京时间每日 00:00、06:00、12:00 和 18:00 的

数据, 因此这里使用模式输出的小时值与之比较。从比较结果可以看出, 模式系统对能见度有较好的模拟能力, 模拟结果的大小和变化趋势与观测值有很好的一致性, 尤其是 10~14 日北京—天津—河北地区出现的能见度低值。此外, 能见度与细颗粒物粒子质量浓度有很好的负相关关系 (Wang et al., 2006; 陶俊等, 2009), 因此这也可以在一定程度上说明模式系统能够对细颗粒物质量浓度合理估算。通过以上评估, 说明模式系统能够合理地模拟华北地区主要气象要素、污染物和能见度的时空分布特征, 模拟结果可用于对本次灰霾过程的进一步探讨。

表 1 API 分级点及其所对应的 PM10 质量浓度

Table 1 The breakpoints of air pollution index (API) and corresponding PM10 mass concentrations

API	0	50	100	200	300	400	500
PM10 质量浓度/ $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0	50	150	350	420	500	600

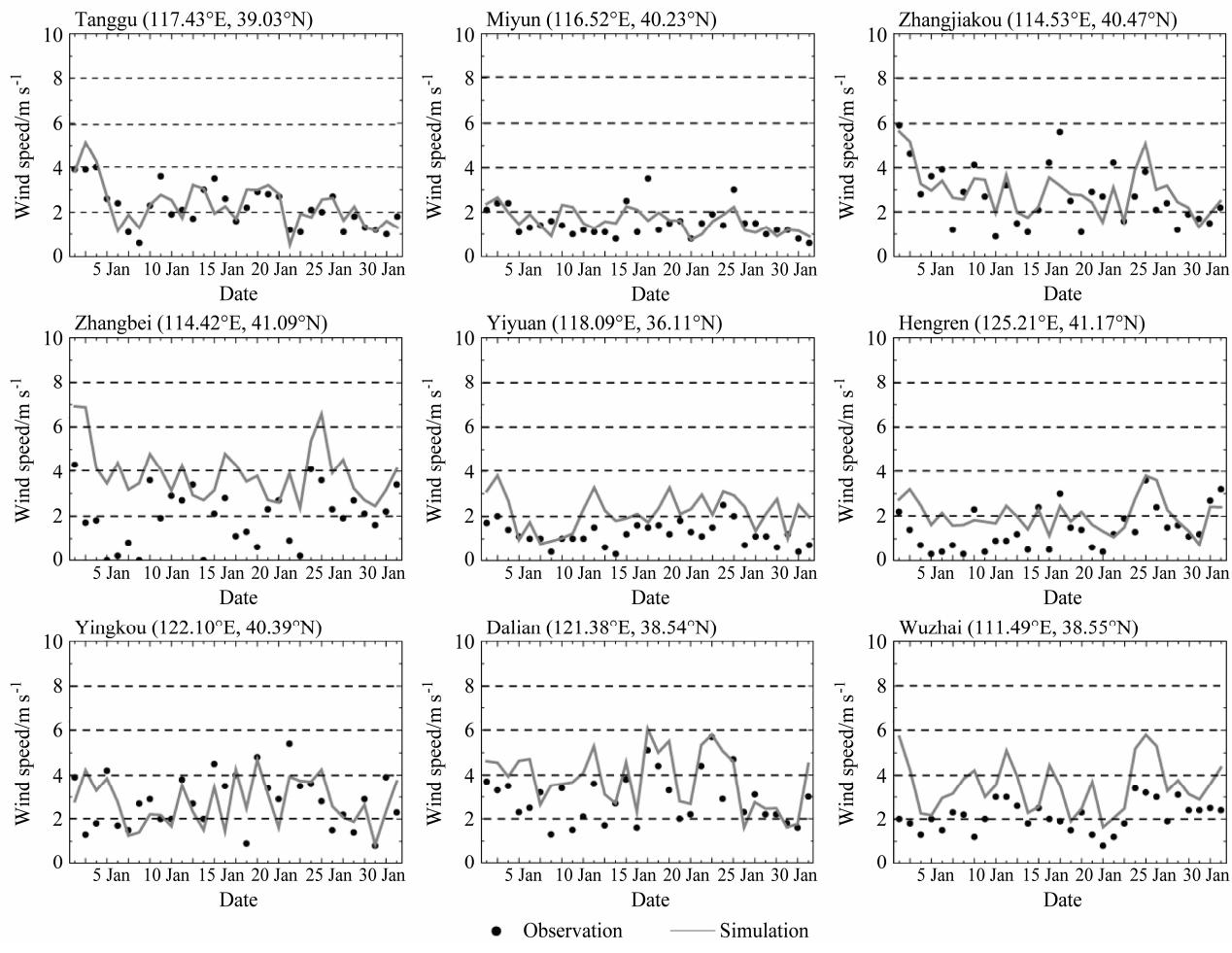


图 4 同图 2, 但为近地面风速

Fig. 4 Same as Fig. 2, but for wind speed

4 结果分析

4.1 细颗粒物质量浓度与能见度时空分布

从图 7 可以看出, 细颗粒物质量浓度在河北省中南部和山东省地区基本都超过了 $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 在北京—天津—唐山、石家庄、济南及这些城市的周边地区, 其质量浓度可超过 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。其中 11 日在北京南部、天津、唐山和石家庄细颗粒物质量浓度达到了 $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的高值, 该高值也出现在了 14 日和 15 日的石家庄和济南市区。总体来看, 10~15 日华北地区大部处在偏南风场的控制下, 这有利于南部污染物向北方输送。其中在 11 日较强的偏南气流甚至可将污染物向东北方向输送, 使辽宁省大部细颗粒物质量浓度达到 $75\sim200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间。

从图 8 可以看出, 能见度低值区与细颗粒物质量浓度的高值区分布特征基本一致, 这也体现了能

见度与细颗粒物粒子高度的相关性。从 1 月 10~15 日, 华北平原基本上都被灰霾所覆盖, 日均能见度低于 10 km 的地区主要出现在北京—天津—唐山城市群、河北省中南部和山东省, 并可在 11 日向东北方向延伸至辽宁省大部地区。其中在北京—天津—唐山一带、石家庄、济南及其附近地区能见度低于 5 km , 这些也是细颗粒物质量浓度超过 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的区域。在城市中心地区, 当细颗粒物质量浓度高于 $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时, 能见度甚至可恶化至 3 km 以下。此外, 可以看到在此次灰霾过程中相对湿度明显偏高。在河北省和山东省灰霾较为严重的 11 日和 15 日, 近地面相对湿度最高值都超过了 80%, 意味着这些地区吸湿性粒子的消光能力会由于湿增长作用而被显著增强。

4.2 气象要素

为了深入了解此次灰霾的成因, 对灰霾发生期间的相关气象要素进行了详细分析。从图 9 可以看

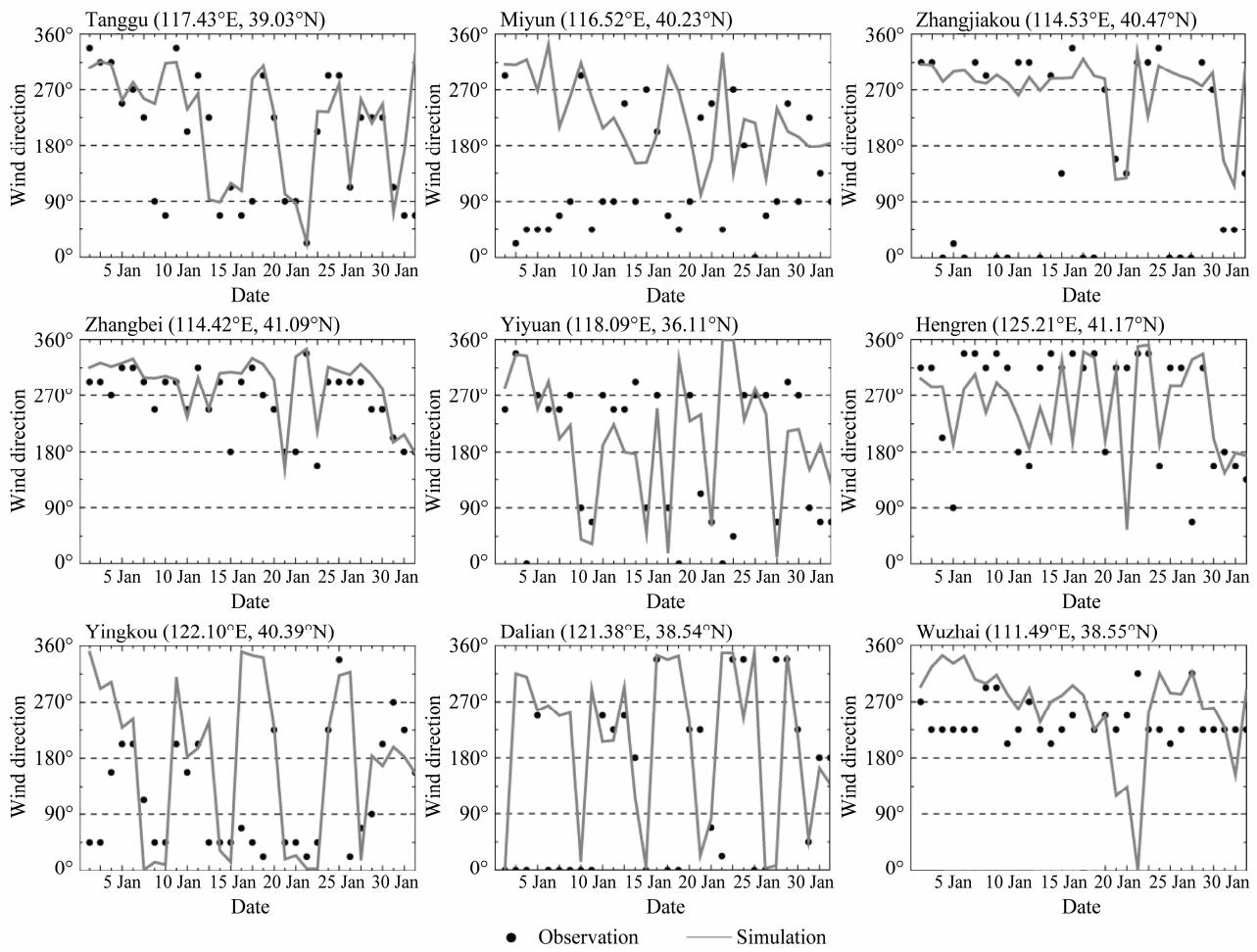


图 5 同图 2, 但为每日最大风速的风向

Fig. 5 Same as Fig. 2, but for wind direction of daily maximum wind speed

出, 灰霾发生期间一直有较为明显的逆温层覆盖在北京上空, 尤其在 12 日和 13 日, 逆温层不仅出现于夜晚, 在对流本应较强的 12:00 至 18:00 同样存在, 直至 14 日才逐渐消散。另外, 近地面风速在大部分时段内均低于 4 m/s, 只在 11 日 18:00 至 12 日 06:00 和 14 日达到近 6 m/s。综合分析二者与能见度的变化趋势特征, 可以看出能见度明显受到二者的共同影响。在 10 日 18:00 至 11 日 12:00, 逆温与低于 4 m/s 的风速同时出现, 能见度快速下降至 10 km 以下, 甚至一度低于 5 km。11 日 18:00 至 12 日 06:00 期间, 由于风速上升至 4 m/s 以上, 能见度回升至 20 km 以上, 随后又在逆温层及低风速的影响下持续下降至 5 km, 到 14 日逐渐恢复。

此外, 收集了中国气象局地面气候资料日值数据集中华北地区 12 个观测站 1993~2012 年近地面日均风速和相对湿度实测数据, 并对 2013 年 1 月的相应气象要素进行了距平分析。表 2 给出了两种

气象要素 1 月全月及 1 月 10~15 日 (即污染时段) 的 20 年平均值。从图 10 可以看出, 与多年平均情况相比, 2013 年 1 月华北大部分地区月均风速都低于多年平均值, 且普遍下降达 20% 以上。2013 年 1 月月均风速仅在保定、石家庄和张家口高于多年平均值, 而这 3 个站点中位于灰霾覆盖地区的石家庄和保定站 1 月多年平均风速仅为 1.4 m/s 左右, 因此实际数值差别也并不大。而在污染时段内, 北京、密云和沂源的风速偏小趋势尤为明显, 分别可达 40%~70%。图 11 则表明 2013 年 1 月华北地区相对湿度与多年平均值存在较大差别。图中显示除了在山西省境内的五寨和太原两个站点相对湿度略微偏小外, 在其他站点 2013 年 1 月相对湿度月均值明显偏高, 分布在华北平原北部的塘沽、天津、张家口和张北站偏高普遍达 10% 左右; 而在北京和其他南部站点偏高可达 20% 以上。污染时段内这种偏高趋势尤为明显, 在北京、保定、密云和石家庄

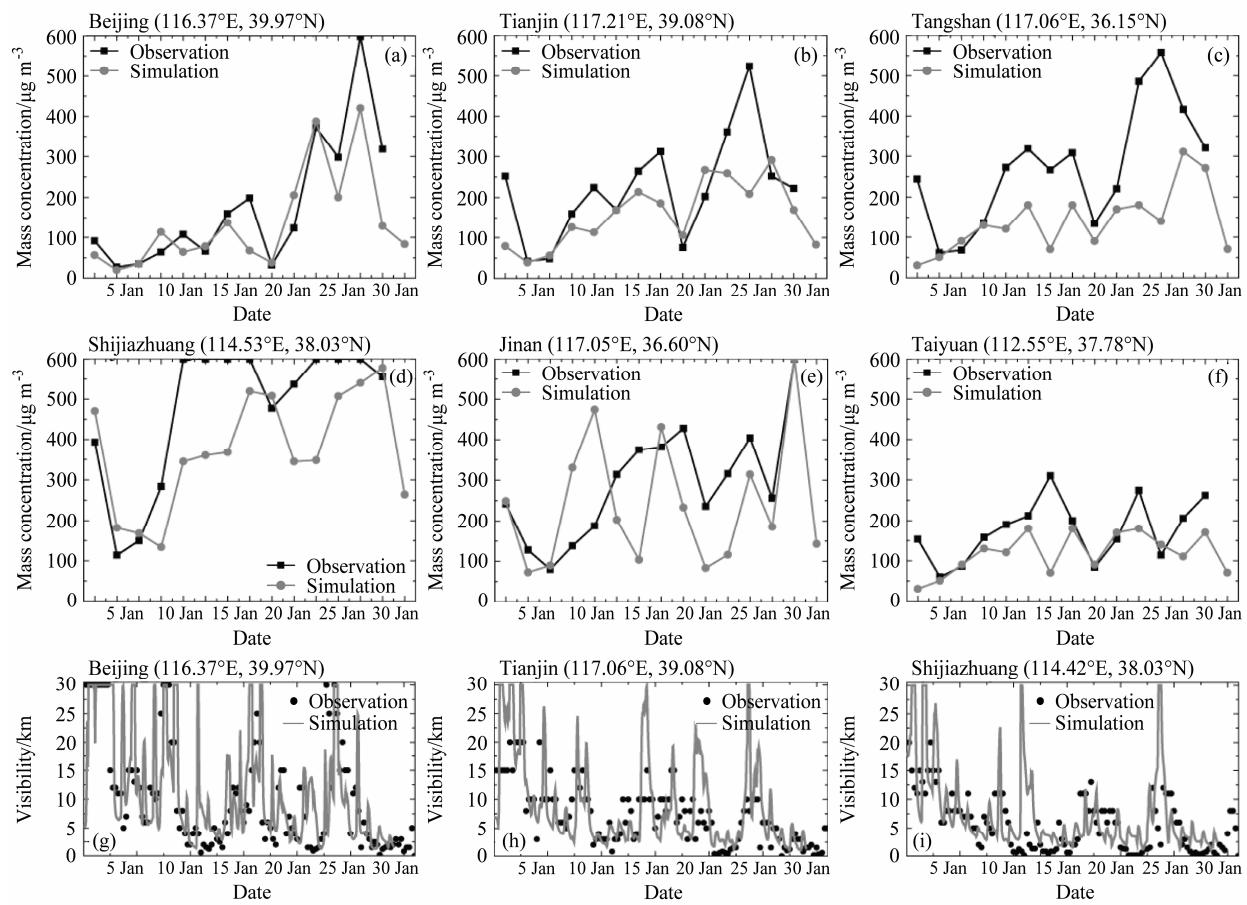


图 6 2013 年 1 月 (a-f) PM10 质量浓度、(g-i) 能见度观测资料与模拟结果比较 (PM10 资料为日均值, 能见度资料为小时值)

Fig. 6 Observed and modeled (a-f) mass concentrations of daily averaged PM10 and (g-i) hourly visibility in Jan 2013 (PM10 data were daily averaged values and visibility data were hourly values)

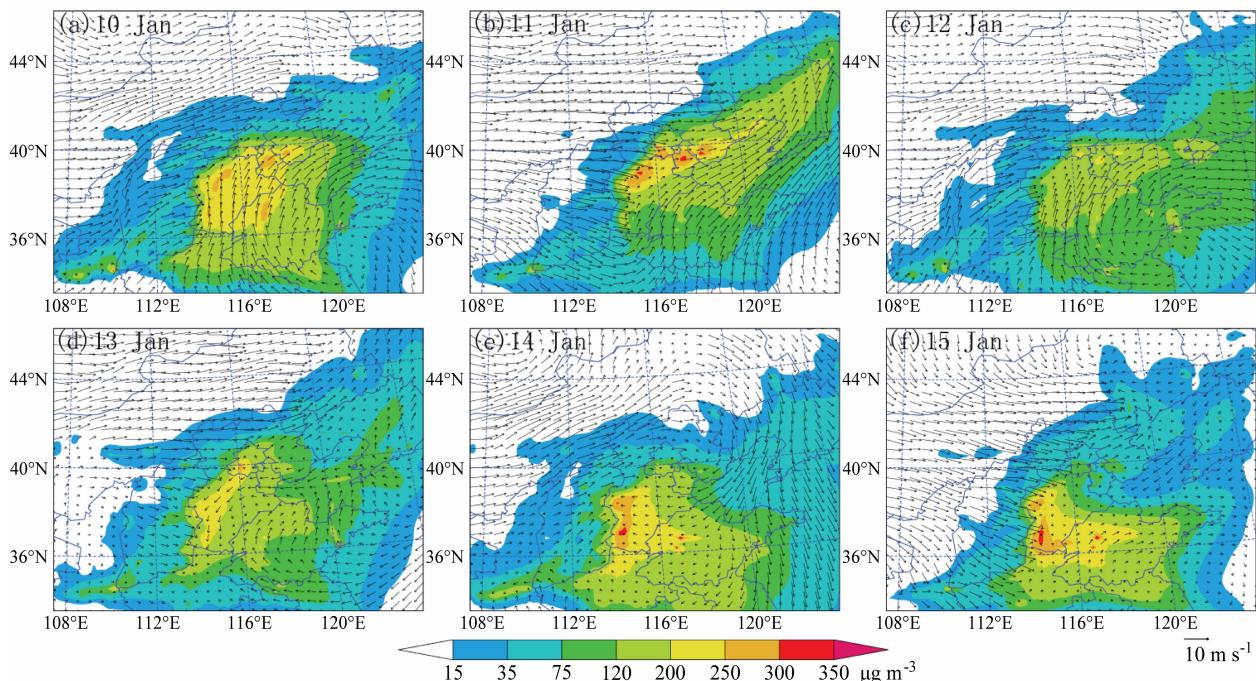


图 7 2013 年 1 月 10~15 日模式模拟华北地区近地面日均细颗粒物质量浓度水平分布 (箭头表示近地面风场)

Fig. 7 The horizontal distributions of modeled daily averaged mass concentration of PM2.5 over North China Plain during 10–15 Jan 2013 (arrows are the surface wind field)

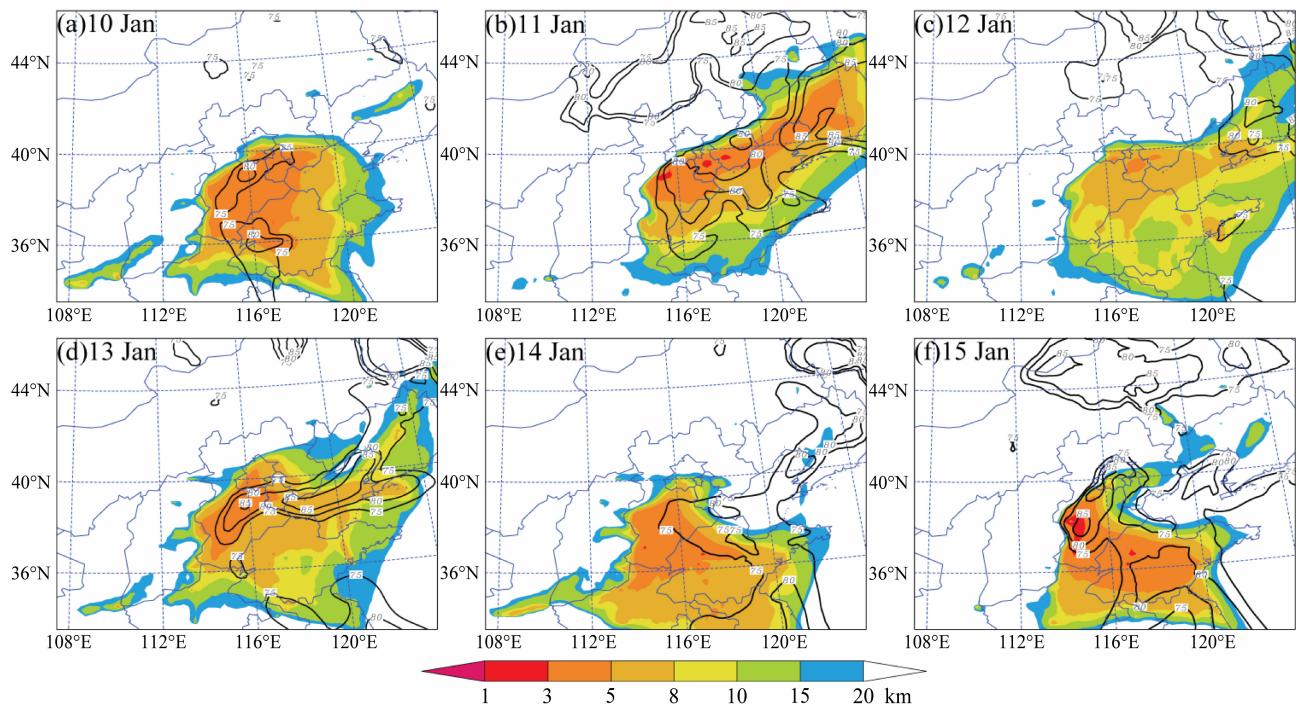


图 8 2013 年 1 月 10~15 日模式模拟华北地区日均能见度水平分布 (黑色实线为近地面相对湿度)

Fig. 8 The horizontal distributions of modeled daily averaged visibility over North China Plain during 10–15 Jan 2013 (black contour lines are the surface relative humidity)

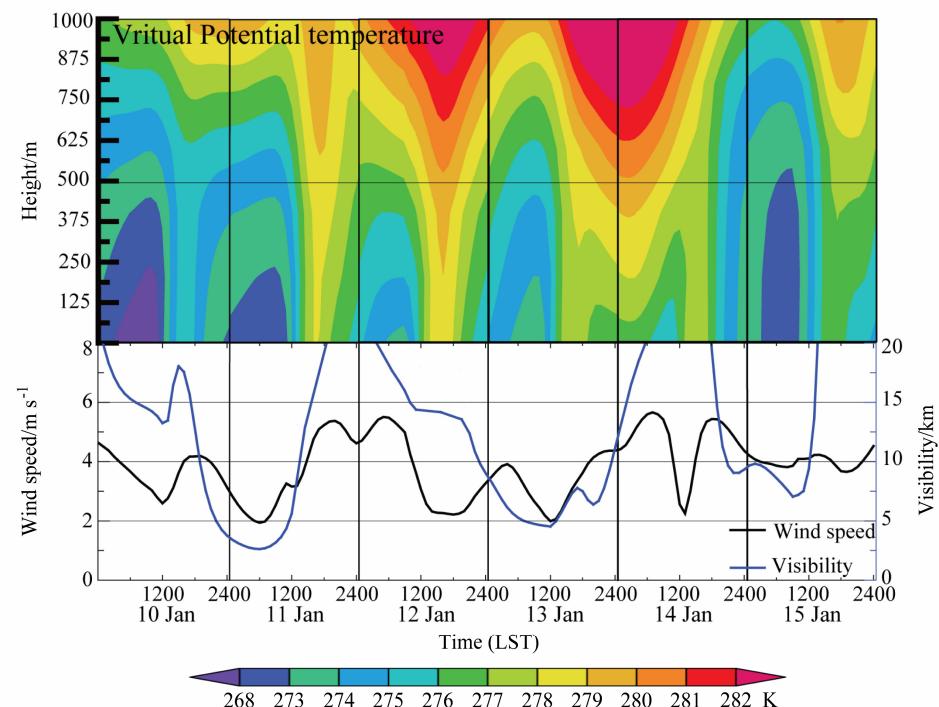


图 9 2013 年 1 月 10~15 日模式模拟北京地区区域平均虚位温垂直分布、近地面风速、能见度小时时间序列

Fig. 9 The modeled regional averaged vertical virtual potential temperature, regional averaged surface wind speed and visibility in Beijing during 10–15 Jan 2013

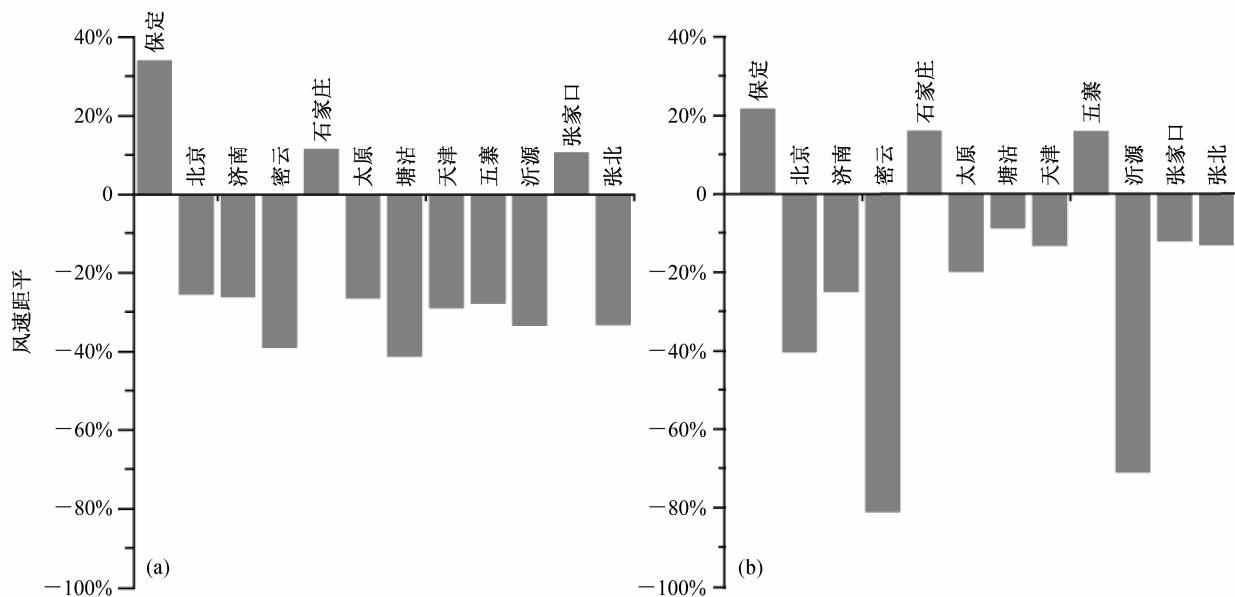


图 10 12 个观测站 2013 年 (a) 1 月和 (b) 1 月 10~15 日污染时段平均近地面风速平均值距平分析

Fig. 10 Anomaly analysis of averaged surface wind speed in (a) Jan 2013 and (b) the pollution episode during 10–15 Jan 2013 at 12 weather stations

可达 40% 以上。结合表 2 给出的平均值可知在污染时段内, 保定、北京、密云、石家庄、天津和沂源站点平均相对湿度都达到冬季少见的 70% 以上, 在保定和石家庄甚至达到 80% 以上。

表 2 1993~2012 年 1 月全月、1993~2012 年 1 月 10~15 日风速和相对湿度平均值

Table 2 The averaged wind speed and relative humidity in whole Jan during 1993–2012 and 10–15 Jan during 1993–2012

观测站点	1 月平均值		1 月 10~15 日平均值	
	风速/ $m\ s^{-1}$	相对湿度	风速/ $m\ s^{-1}$	相对湿度
保定	1.41	58.05%	1.41	60.33%
北京	2.37	42.90%	2.24	46.25%
济南	2.77	51.20%	2.93	53.83%
密云	2.47	46.70%	2.35	49.83%
石家庄	1.39	52.16%	1.24	57.33%
太原	3.42	51.08%	1.65	52.21%
塘沽	4.80	53.67%	2.86	55.38%
天津	3.94	57.40%	2.15	58.79%
五寨	3.82	58.42%	2.08	60.00%
沂源	1.80	55.60%	1.76	58.33%
张家口	2.48	42.72%	2.43	44.22%
张北	2.95	60.68%	2.62	61.86%

综合以上对相关气象要素的分析, 可以看出 2013 年 1 月 10~15 日华北地区的天气形势与重霾过程的产生和发展有非常密切的联系。一方面, 强逆温层和偏低的地面风速使得大气层结非常稳定, 大气对流和水平扩散能力均明显减弱, 极容易造成

污染物的累积增加; 另一方面, 明显偏高的相对湿度可使人为排放的无机盐类粒子湿增长特性显著增强, 由于吸湿性粒子的消光特性会随相对湿度上升成指数型递增 (Malm et al., 1994), 因此在相对湿度超过 70% 时这种湿增长效应会表现的尤为明显。2013 年 1 月出现的以上天气特征在近 20 年都非常少见, 是造成重霾过程的重要因素之一。

4.3 主要气溶胶物种对近地面消光的贡献

为了进一步了解不同气溶胶物种对灰霾过程的影响, 图 12 给出了模式模拟的 1 月 9~16 日北京地区区域平均 PM10 粒子中主要气溶胶物种的质量浓度百分比及其对近地面消光的贡献比率。表 3 列出了 1 月 10~15 日 PM10 粒子中主要气溶胶物种质量浓度百分比及其对近地面消光的贡献比率的平均值。从图 11 可以看出, 硫酸盐、硝酸盐和铵盐这 3 种无机盐是北京地区气溶胶粒子的主要成分。无论在灰霾过程中和前后时段, 3 种无机盐所占质量浓度比率均达到 40% 以上, 对消光的贡献比率均达到 50% 以上。其中硝酸盐的质量浓度百分比和消光贡献最高, 平均值分别为 21.15% 和 25.84%, 表明这次灰霾过程约有 1/4 的贡献来自硝酸盐气溶胶。由于除相关工业源外, 机动车尾气排放是硝酸盐的主要来源之一, 这也就意味着目前交通源排放已经成为北京市不可忽略的大气污染源。此外, 含碳类气溶胶 (黑碳和有机碳) 的质量浓度百分比和消光贡献比率平均可达 24.73% 和 21.86%, 也是这

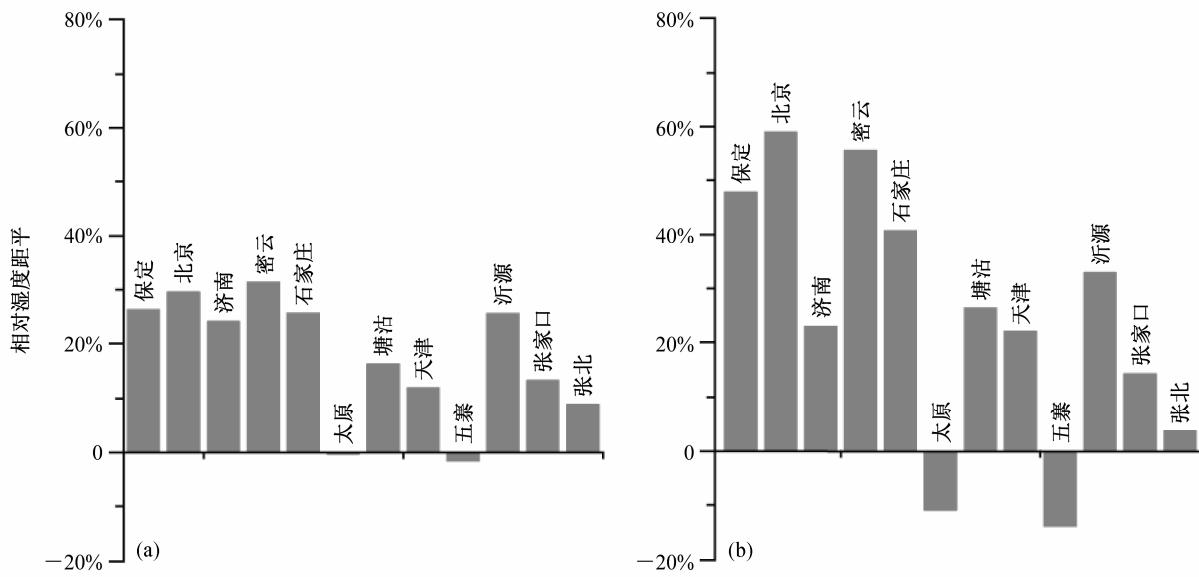


图 11 同图 10, 但为相对湿度
Fig. 11 Same as Fig. 10, but for relative humidity

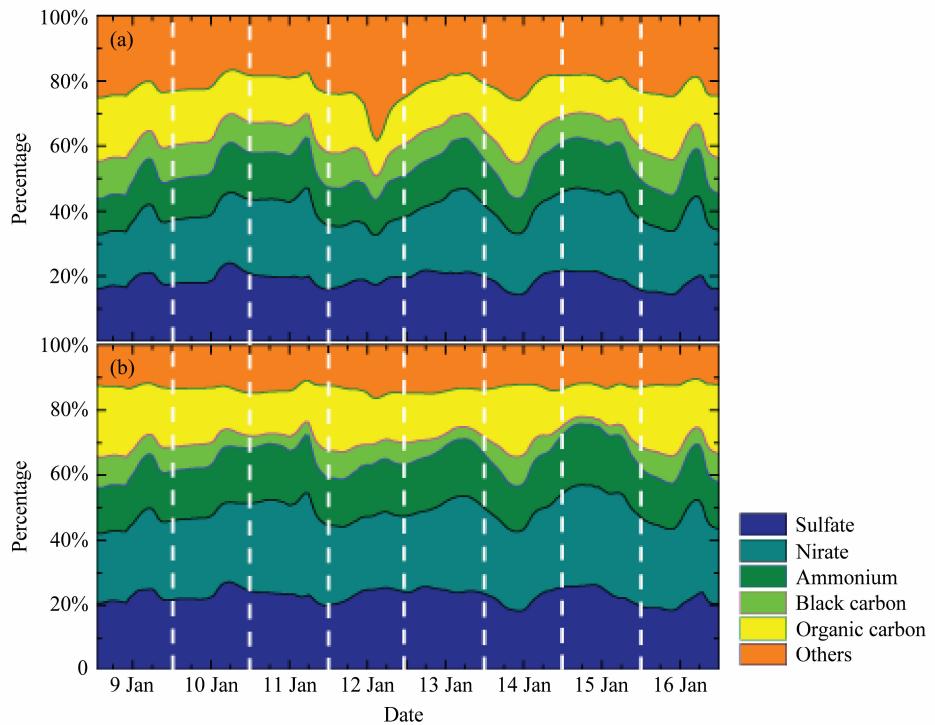


图 12 模式模拟 2013 年 1 月 9~16 日北京地区区域平均 PM10 粒子中主要气溶胶物种的 (a) 质量百分比和 (b) 消光贡献比率小时时间序列
Fig. 12 Modeled regional averaged (a) mass proportions of major aerosol components to PM10 and (b) the contribution ratios of major aerosol components to the total extinction in Beijing area during 9–16 Jan 2013

次灰霾过程的主要贡献物种。其中，有机碳气溶胶的质量浓度百分比和消光贡献比率均可达 15% 以上。由于该类气溶胶基本来源于挥发性有机物的转换形成，这也意味着这次灰霾过程中含有大量的有机物成分，其来源多样、成分复杂，且大多具有强烈毒性，对人体危害极大。

在 12 日 12:00 至 24:00，可以看到代表粗粒子颗粒物的其他气溶胶物种质量浓度比率出现了一个峰值，达到约 40%，这表明该时段可能有浮尘出现。但在消光贡献比率中可以看出这次粗粒子的质量浓度增长并未引起明显的消光比率升高，相反无机盐的贡献比率却有略微升高，这很有可能是由于

沙尘粒子和无机盐粒子的内部混合作用使无机盐气溶胶消光作用增强所致。另外也说明 PM10 对能见度衰减所起的作用远低于细颗粒物。

表 3 2013 年 1 月 10~15 日北京地区主要气溶胶物种的质量浓度百分比及其对能见度衰减的贡献比率平均值

Table 3 The regional averaged mass percentage and extinction contribution of major aerosol components in Beijing during 10–15 Jan 2013

	硫酸盐	硝酸盐	铵盐	黑碳	有机碳	其他
质量浓度百分比	18.95%	21.15%	13.25%	9.39%	15.34%	21.92%
能见度衰减贡献	23.00%	25.84%	16.12%	5.94%	15.92%	13.18%

5 结论

利用耦合了气溶胶光学特性模块的区域空气质量模式系统 RAMS-CMAQ 对 2013 年 1 月华北地区气象场及主要气溶胶粒子, 包括硫酸盐、硝酸盐、铵盐、黑碳、有机碳、沙尘和海盐的时空分布进行了模拟, 并依据其光学特性计算了近地面水平能见度。通过与观测资料比较, 模式对主要气象要素、气溶胶质量浓度和能见度均有可靠的模拟能力。此外, 收集了华北地区 12 个观测站 1993~2013 年 1 月近地面日均风速和相对湿度实测数据, 综合利用观测数据和模拟结果, 对发生在 2013 年 1 月 10~15 日的重霾过程进行了分析, 并深入探讨了引起这次灰霾过程的主要因素。通过研究, 得到的主要结论有以下几点:

(1) 2013 年 1 月 10~15 日华北平原大气污染严重, 受影响的区域主要分布在北京—天津—唐山、河北省中南部和山东省大部地区。细颗粒物日均质量浓度在该区域内可达 $120\sim250 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 在北京、天津、石家庄和济南的市区可上升至 $250\sim300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。受此影响, 以上地区大气能见度可下降至 5 km 以下。在天津和石家庄, 日均能见度甚至可下降至 3 km 以下, 形成重度灰霾。

(2) 通过距平分析, 发现本次罕见重霾与特殊的气象条件紧密相关。一方面, 2013 年 1 月华北平原大部分地区水平风速较多年平均值偏小约 20%, 且有明显逆温覆盖, 造成污染物难以扩散, 积累叠加; 另一方面, 北京—天津—唐山、河北省南部和山东省北部的相对湿度比多年平均值偏高达 10%~40%, 在河北省中南部相对湿度甚至可达到冬季少见的 80% 以上, 从而造成吸湿性粒子消光效

应的指数型增长, 使能见度快速下降。

(3) 通过分析模式模拟结果表明, 在北京地区引发灰霾的主要气溶胶物种为硫酸盐、硝酸盐和铵盐这 3 种无机盐气溶胶, 其对能见度衰减的贡献比率可达 50% 以上。其中贡献比率最高的是硝酸盐气溶胶, 其消光效应可达总体效应的 1/4, 说明在这次污染过程中, 除相关工业源外, 交通源排放已经成为北京市不可忽略的大气污染源。另外, 有机碳气溶胶对能见度衰减的贡献比率可达 15% 以上, 由于该类气溶胶成分复杂、对人体健康的危害极大, 因此对相关污染源的控制也不容忽视。

参考文献 (References)

- Che H Z, Zhang X Y, Li Y, et al. 2007. Horizontal visibility trends in China 1981–2005 [J]. Geophys. Res. Lett., 34 (24), doi:10.1029/2007GL031450.
- Chuang C, Penner J, Prospero J, et al. 2002. Cloud susceptibility and the first aerosol indirect forcing: Sensitivity to black carbon and aerosol concentrations [J]. J. Geophys. Res., 107 (D21): AAC10-1–AAC10-23.
- Cotton W, Pielke R, Walko R, et al. 2003. RAMS 2001: Current status and future directions [J]. Meteor. Atmos. Phys., 82: 5–29.
- 关月, 何立富. 2013. 2013 年 1 月大气环流和天气分析 [J]. 气象, 39 (4): 531–536.
- Guan Yue, He Lifu. 2013. Analysis of the January 2013 atmosphere circulation and weather [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 39 (4): 531–536.
- Han X, Zhang M G, Han Z W, et al. 2011. Simulation of aerosol direct radiative forcing with RAMS-CMAQ in East Asia [J]. Atmos. Environ., 45 (36): 6576–6592.
- 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.
- Lu Z, Zhang Q, Streets D G. 2011. Sulfur dioxide and primary carbonaceous aerosol emissions in China and India, 1996–2010 [J]. Atmos. Chem. Phys., 11: 9839–9864.
- Malm W C, Sisler J F, Huffman D, et al. 1994. Spatial and seasonal trends in particle concentration and optical extinction in the United States [J]. J. Geophys. Res., 99 (D1): 1347–1370.
- Nenes A, Pandis S N, Pilinis C. 1999. Continued development and testing of a new thermodynamic aerosol module for urban and regional air quality models [J]. Atmos. Environ., 33 (10): 1553–1560.
- Quan J, Zhang Q, He H, et al. 2011. Analysis of the formation of fog and haze in North China Plain (NCP) [J]. Atmos. Chem. Phys., 11 (15): 8205–8214.
- Sarwar G, Luecken D, Yarwood G, et al. 2008. Impact of an updated carbon bond mechanism on predictions from the CMAQ modeling system: Preliminary assessment [J]. J. Appl. Meteor. Climat., 47: 3–14.
- Sun Y, Zhuang G, Tang A A, et al. 2006. Chemical characteristics of PM2.5 and PM10 in haze–fog episodes in Beijing [J]. Environ. Sci. Technol., 40 (10): 3148–3155.

- 陶俊, 张仁健, 徐振成, 等. 2009. 广州冬季大气消光系数的贡献因子研究 [J]. 气候与环境研究, 14 (5): 484–490. Tao Jun, Zhang Renjian, Xu Zhencheng, et al. 2009. Contribution factors of ambient light extinction coefficient in the winter of Guangzhou [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (5): 484–490.
- Tao M, Chen L, Su L, et al. 2012. Satellite observation of regional haze pollution over the North China Plain [J]. J. Geophys. Res., 117 (D12203), doi:10.1029/2012JD017915.
- 王从梅, 杨永胜, 李永占, 等. 2013. 2013年1月河北省中南部严重污染的气象条件及成因分析 [J]. 环境科学研究, 26 (7): 695–702. Wang Congmei, Yang Yongsheng, Li Yongzhan, et al. 2013. Analysis on the meteorological condition and formation mechanism of serious pollution in south Hebei Province in January 2013 [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 26 (7): 695–702.
- Wang J L, Zhang Y H, Shao M, et al. 2006. Quantitative relationship between visibility and mass concentration of PM_{2.5} in Beijing [J]. J. Environ. Sci., 18 (3): 475–481.
- 王喜全, 孙明生, 杨婷, 等. 2013. 京津冀平原地区灰霾天气的年代变化 [J]. 气候与环境研究, 18 (2): 165–170. Wang Xiquan, Sun Mingsheng, Yang Ting, et al. 2013. Interdecadal change in frequency of dust–haze episodes in North China Plain [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (2): 165–170.
- Wu Q Z, Wang Z F, Gbaguidi A, et al. 2011. A numerical study of contributions to air pollution in Beijing during CAREBeijing-2006 [J]. Atmos. Chem. Phys., 11: 5997–6011.
- Yu X N, Zhu B, Yin Y, et al. 2011. A comparative analysis of aerosol properties in dust and haze–fog days in a Chinese urban region [J]. Atmos. Res., 99 (2): 241–247.
- Zhang M G, Uno I, Sugata S, et al. 2002. Numerical study of boundary layer ozone transport and photochemical production in East Asia in the wintertime [J]. Geophys. Res. Lett., 29 (11): 40-1–40-4, doi: 10.1029/2001GL014368.
- Zhang M G, Xu Y F, Zhang R J, et al. 2005. Emissions and concentration distributions of black carbon aerosol in East Asia during the springtime [J]. Chinese Journal of Geophysics, 48 (1): 55–61.
- Zhang M G, Uno I, Zhang R J, et al. 2006. Evaluation of the models-3 Community Multi-scale Air Quality (CMAQ) modeling system with observations obtained during the TRACE-P experiment: Comparison of ozone and its related species [J]. Atmos. Environ., 40 (26): 4874–4882.
- Zhang M G, Gao L J, Ge C, et al. 2007. Simulation of nitrate aerosol concentrations over East Asia with the model system RAMS-CMAQ [J]. Tellus B, 59 (3): 372–380.
- Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, et al. 2009. Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission [J]. Atmos. Chem. Phys., 9: 5131–5153.
- 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 2013. 我国雾—霾成因及其治理的思考 [J]. 科学通报, 58 (13): 1178–1187. Zhang Xiaoye, Sun Junying, Wang Yaqiang, et al. 2013. Factors contributing to haze and fog in China [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 58 (13): 1178–1187.
- Zhao P S, Zhang X L, Xu X L, et al. 2011. Long-term visibility trends and characteristics in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China [J]. Atmos. Res., 101 (3): 711–718.